

SOMMARIO

Lo stesura di questa tesi è puntata alla specificazione e alla comprensione più approfondita dei concetti che riguardano i sistemi di trasmissione ottici. Il più di questi sistemi si basa sull'uso della fibra ottica, la quale presenta caratteristiche che devono essere adatte alla sempre più crescente richiesta di banda per le trasmissioni dati di utenti finali come clienti business e privati. Vogliamo qui specificare quindi le sue caratteristiche, le sue limitazioni e soprattutto le sue applicazioni nel mondo delle comunicazioni ottiche.

Nel contesto dei sistemi ottici di trasmissione vogliamo quindi anche specificare i vari tipi di modalità di accesso al mezzo puntando di più verso le tecniche di trasmissione dati su mezzo condiviso come la "modulazione" WDM, mettendo in risalto le varie tipologie con le rispettive caratteristiche e confrontandole da un punto di vista della qualità di servizio offerto e dal punto di vista della convenienza economica.

Infine parliamo anche dei progressi tecnologici e delle limitazioni trovate andando incontro ad un incremento di velocità di connessione tramite fibra ottica e con l'uso di tecniche WDM. Parliamo infatti delle difficoltà trovate nel raggiungimento di una velocità che si aggira intorno al Tb/s; si parla delle rispettive caratteristiche richieste per i vari componenti del sistema e le principali limitazioni trovate in laboratorio nei vari esperimenti.

INDICE

1. Introduzione alle fibre ottiche

pag 3

- Principi e parametri caratteristici di una fibra ottica
 - Parametri principali
 - Tipi di fibre e principali limitazioni
- Dispersione e attenuazione
 - Dispersione intramodale
 - Attenuazione lineare
 - Attenuazione non lineare
- Processi di fabbricazione
 - Preforma e tecniche di realizzazione
 - Filatura della preforma
- Cavi in fibra ottica

2. I sistemi ottici di trasmissione

pag 15

- Evoluzione dei sistemi ottici di trasmissione
- Schema a blocchi di un sistema ottico di trasmissione
- Optical transport network
- Passive optical network(soluzioni PON)
- Tecniche di accesso al mezzo condiviso
 - sistemi monocanale
 - sistemi multicanale
- Optical packet metro
- Sistemi ottici automatizzati
- Verso una rete tutta ottica

3. Tecniche WDM

pag 35

- Sistemi WDM
 - componenti di un sistema WDM
- Sistemi "sparse" WDM
- Sistemi DWDM
 - Definizione
 - Applicazioni e specifiche
- Sistemi CWDM
 - Definizione
 - Applicazioni e specifiche
- DWDM vs CDWM

4. Verso il Tb/secondo

pag 55

- Introduzione
- Limitazioni e problematiche

INTRODUZIONE ALLE FIBRE OTTICHE

Principi e parametri caratteristici di una fibra ottica:

Un raggio luminoso che incide su una superficie di interfaccia tra due mezzi di indici diversi ($n_1 > n_2$) viene in parte riflesso e in parte rifratto o trasmesso, secondo la nota legge di Snell (o legge dei seni): $n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$, dove α_1 è l'angolo di incidenza del raggio rispetto la normale alla superficie nel punto di incidenza e α_2 è l'angolo che il raggio rifratto forma con la stessa normale nel secondo mezzo. Poiché $n_2 < n_1$, il raggio trasmesso tende ad aumentare α_2 all'aumentare di α_1 sino a quando si arriva alla condizione per cui si ha $\alpha_2 = \pi/2$, ovvero assenza di raggio rifratto. In quest'ultima situazione si è in presenza del fenomeno di riflessione totale, in cui l'angolo d'incidenza oltre il quale si ha assenza di rifrazione è $\alpha_c = \arcsin(n_2/n_1)$, generalmente indicato come angolo critico.

In prima approssimazione possiamo intuire che i raggi giacenti su di un piano comprendente l'asse della fibra ottica, che incidono l'interfaccia vetro/aria con angolo maggiore di α_c , vengono riflessi totalmente e, quindi, restano confinati all'interno della fibra indefinitamente. Il principio appena descritto è alla base del funzionamento di tutti i tipi di fibra ma nel campo delle telecomunicazioni è preferibile poter variare con precisione il valore dell'indice di rifrazione sia della fibra vera e propria (mezzo 1), sia del mezzo che la ricopre (mezzo 2). Si ottiene così la struttura fondamentale di realizzazione di una fibra, costituita da un cilindro interno, indicato come nucleo o core, e da un rivestimento esterno, indicato come mantello o cladding.

Entrambi sono in realtà costituiti dallo stesso materiale vetroso, in cui i due indici di rifrazione vengono variati e controllati con precisione durante la fabbricazione della fibra mediante l'aggiunta di droganti esterni (ossidi di germanio, piombo o alluminio). In una fibra per telecomunicazioni il diametro esterno è tipicamente di $125\mu\text{m}$, mentre il diametro del nucleo varia tra pochi μm e $50\mu\text{m}$ a seconda del tipo di fibra. La fibra così prodotta risulterebbe meccanicamente fragile; è allora necessario irrobustirla mediante ulteriori rivestimenti plastici.

→ Parametri principali:

Indipendentemente dal tipo, ogni fibra è caratterizzata da alcune grandezze che ne definiscono le proprietà fondamentali.

Si è visto che se viene inviato nel nucleo della fibra un raggio luminoso con un angolo di incidenza, tra nucleo e mantello, inferiore all'angolo critico, questo viene parzialmente riflesso/rifratto. La parte rifratta si perde per rifrazione nel mezzo circostante mentre la parte riflessa subisce una nuova riflessione/rifrazione, e così via. In pratica dopo poche riflessioni il raggio si esaurisce e non viene guidato all'interno della fibra. Si dice, in questo caso, che il raggio non è accettato dalla fibra.

E' possibile definire un cono di accettazione che contiene tutti quei raggi che possono propagarsi all'interno del nucleo per riflessione totale. Il vertice del cono è il centro della faccia di ingresso della fibra e l'angolo al vertice viene detto angolo di accettazione θ_a .

L'angolo di accettazione può essere messo in relazione con i due indici di rifrazione n_1 e n_2 (rispettivamente del nucleo e del mantello) mediante la relazione:

$$\theta_a = \arcsin[(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}]$$

Spesso non viene fornito θ_a ma una quantità ad esso legata che viene indicata come apertura numerica (o semplicemente apertura) definita da: $NA = \sin\theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$. Risulta evidente che maggiore è NA, più semplice è accoppiare efficientemente una sorgente luminosa alla fibra, in quanto è più ampio il cono di accettazione. Per identificare univocamente i valori di n_1 e n_2 che realizzano una certa apertura numerica, nota quest'ultima, si utilizza un parametro che prende il nome di variazione percentuale dell'indice di rifrazione definito come: $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$. E' facile, allora, rendersi conto che se $n_1 = n_2$, ovvero se $\Delta \ll 1$, si ottiene anche: $NA = n_1(2\Delta)^{1/2}$ e, quindi, più grande è la distanza tra n_1 e n_2 , maggiore sarà la variazione Δ e la NA.

→ Tipi di fibre e principali limitazioni:

Il tipo di fibra più semplice è costituito da un nucleo e un mantello che presentano una discontinuità a gradino tra i due indici di rifrazione e per questo è detta Step-Index. Il raggio del nucleo è, inoltre, detto largo, in quanto è molto maggiore della lunghezza d'onda generalmente utilizzata nei sistemi di telecomunicazioni ($1,55\mu\text{m}$); per questo, come vedremo in seguito, questo tipo di fibra consente la propagazione di più tipi di raggi detti modi. In particolare, il fatto che possano propagarsi più modi fa sì che questo tipo di fibra sia caratterizzata da un fenomeno di dispersione intermodale.

Per chiarire il concetto di dispersione, consideriamo due raggi entranti nella fibra, il primo con angolo di incidenza minimo ($\theta = 0$) e il secondo con angolo di incidenza massimo ($\theta = \theta_a$), nello stesso istante di tempo. Considerando la distanza L percorsa lungo l'asse della fibra, è evidente che i due raggi compiono percorsi diversi per giungere nel medesimo punto e, quindi, impiegano due tempi diversi per coprire la stessa distanza. Questo fa sì che ci sia un ritardo temporale relativo tra i due raggi, indicato, appunto, come dispersione intermodale, che corrisponde ad un ritardo differenziale pari a: $\Delta t = (Ln_1^2\Delta)/(c \cdot n_2)$, pur considerando che i due raggi viaggiano alla stessa velocità ($v = c/n$) in quanto viaggianti nello stesso mezzo.

Le fibre che consentono più modi di propagazione (multimodo) sono caratterizzate dal fenomeno della dispersione intermodale, che può rivelarsi dannoso quando Δt è confrontabile con la durata T di un impulso lanciato in fibra. Da questo fenomeno nasce il fenomeno dell'interferenza intersimbolica che causa il degradimento, anche sensibile, delle prestazioni del sistema di trasmissione. La dispersione intermodale impone un limite alla massima velocità di trasmissione dell'informazione, in particolare, per un segnale binario, si trova che la velocità di trasmissione è limitata superiormente dalla quantità:

$B \leq (c \cdot n_2)/(\Delta \cdot L \cdot n_1^2)$ e che tale limite aumenta al diminuire di Δ .

Quanto si è detto fino ad ora è relativo a raggi appartenenti a piani contenenti l'asse della fibra (meridionali) e nell'approssimazione dell'ottica geometrica, quest'ultima valida fino a quando il raggio del nucleo può considerarsi molto maggiore della lunghezza d'onda del segnale trasmesso in fibra.

In realtà, in una fibra multimodo possono propagarsi anche raggi non appartenenti a piani meridionali, detti sghembi, per i quali si può dimostrare che la propagazione avviene avvolgendo l'asse della fibra e che derivano da raggi esterni al cono di accettazione. Poiché tali raggi si propagano su di un guscio cilindrico sulla parte esterna del nucleo, contribuiscono marginalmente all'intensità luminosa del segnale e vengono di solito ignorati nei calcoli di dispersione.

Per contrastare il fenomeno della dispersione intermodale sono state fabbricate delle fibre in cui i raggi vengono guidati, mediante la variazione dell'indice di rifrazione del nucleo tra un valore massimo ed uno minimo via via che ci si allontana dall'asse della fibra. Questo tipo di fibre sono indicate come Graded-Index e in esse i raggi vengono incurvati dalla variazione graduale di n .

In queste condizioni la dispersione intermodale viene attenuata per effetto della graduazione di n . Infatti i raggi più distanti dall'asse transitano in zone con n minore rispetto a quelli più vicini all'asse della fibra, per cui la loro velocità di propagazione è maggiore della velocità dei raggi più vicini all'asse. Si ha, così, una sorta di compensazione dell'allungamento del percorso compiuto, non sufficiente ad annullare il ritardo differenziale Δt ma solo ridurlo.

Tutto ciò consente un incremento di capacità, rispetto alla fibra step-index, pari ad un fattore $8/\Delta$ e consente di passare da una capacità di 10Mbit/s*Km, per la step-index, ad una capacità di 4Gbit/s*Km per la fibra graded-index.

Dispersione e attenuazione:

→ Dispersione intramodale:

La realizzazione di fibre monomodali si è resa necessaria per contrastare il fenomeno della dispersione intermodale. Sfortunatamente è possibile avere dispersione di un segnale anche in condizioni di monomodalità; infatti, per questo tipo di fibre, si presenta il fenomeno della dispersione intramodale. Essa è causata dalla cosiddetta dispersione cromatica, dovuta ad una proprietà fisica dei vetri silicei con cui la fibra viene realizzata. Da un punto di vista ottico, il vetro è un materiale lineare, ovvero ad esso è applicabile il principio di sovrapposizione degli effetti ma, sfortunatamente, è dispersivo, ovvero l'indice di rifrazione viene a dipendere dalla lunghezza d'onda del segnale, cioè $n = n(\lambda)$. In un mezzo dispersivo segnali di lunghezza d'onda diverse si propagano con velocità diverse. In particolare, se il segnale è modulato, esso è scomponibile come sovrapposizione di più oscillazioni monocromatiche a diverse lunghezze d'onda su di un intervallo centrato attorno alla lunghezza d'onda portante λ_0 . Poiché $n = n(f)$, la velocità di propagazione v_g della generica componente dipende dalla frequenza, $v_g = v_g(f)$.

E' evidente che, se le componenti di un segnale modulato si propagano nel mezzo con velocità di gruppo diverse, una volta raccolte all'estremità di uscita della fibra, esse si ricombinano con ritardi diversi, dando così luogo ad una distorsione lineare di fase. E' possibile studiare il fenomeno della dispersione cromatica utilizzando il formalismo degli involucri complessi, considerando un'onda piana modulata monocromatica, che si propaga in un mezzo omogeneo, isotropo, lineare, dispersivo e senza perdite, lungo l'asse z. Poiché il mezzo è lineare, possiamo studiare il fenomeno cercando di ricavare la risposta in frequenza (che caratterizza completamente un sistema lineare) del sistema costituito dalla fibra stessa. Sfruttando il fatto che quando l'ingresso di un sistema lineare è una oscillazione monocromatica, di frequenza ν , anche l'uscita è monocromatica di frequenza ν , al più modificata in ampiezza e fase proporzionalmente al valore che assume la risposta in frequenza per quel valore di ν , si trova con facilità un'espressione per la risposta in frequenza $H(\nu)$ della fibra. Introducendo il coefficiente di dispersione:

$$D \triangleq \frac{d(1/\nu_g)}{d\lambda} = \frac{d(1/\nu_g)}{df} \frac{df}{d\lambda} = -\frac{c}{\lambda^2} \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\beta}{df^2}$$

e supponendo che il mezzo sia debolmente dispersivo ($n(\lambda)$ varia poco se la banda è modesta rispetto alla lunghezza d'onda portante λ_0), è possibile scrivere un'espressione di $H(\nu)$ approssimata:

$$H(\nu) \cong \exp\left\{-j2\pi\nu\frac{z}{\nu_g}\right\} \exp\left\{j\nu^2 \frac{\pi D \lambda_0^2 z}{c}\right\}$$

Si può subito osservare che, se il mezzo è non dispersivo, allora:

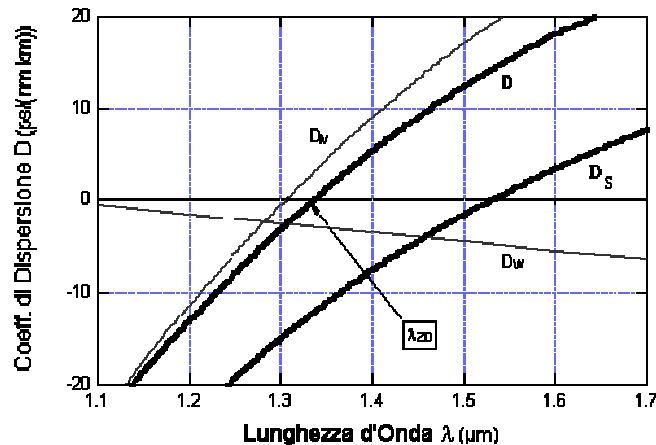
$$\frac{d^k\beta}{df^k} = 0, k \geq 2$$

e la $H(\nu)$ si riduce al consueto termine di ritardo di gruppo.

Applicando l'analisi precedente al caso di una fibra monodimensionale, si trova che il ritardo differenziale massimo, dovuto alla dispersione cromatica, può essere espresso come:

$$|\Delta t| \cong L \left| \frac{d(1/\nu_g)}{d\lambda} \right| \Delta\lambda = L |D| \Delta\lambda$$

Il parametro D diviene perciò un parametro molto importante per descrivere il comportamento di una fibra monomodo. D viene fornito, generalmente, in unità ps/(nm*Km) e indica l'aumento della durata di un impulso caratterizzato da una lunghezza spettrale $\Delta\lambda$ che ha viaggiato per un chilometro in fibra.



Dalla figura precedente si può osservare che, quando $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ (λ_{ZD} , Zero Dispersion), il coefficiente di dispersione è praticamente nullo mentre, quando $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, il coefficiente di dispersione vale $12 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{Km})$ circa. Considerando che lo spettro del segnale che viene trasmesso ha un'estensione non nulla intorno alla lunghezza portante $\lambda_0 = \lambda_{ZD}$, le varie componenti risulteranno in qualche misura ritardate e, quindi, un piccolo grado di dispersione è presente anche intorno a λ_{ZD} , derivante da fenomeni dipendenti da derivate di ordine superiore di β .

Elaborandone ulteriormente l'espressione, si trova che D può scomporsi in due termini (entrambi in figura a tratto più sottile): D_M , indice di dispersione dovuto al materiale e D_W , indice di dispersione dipendente dalla guida d'onda e, quindi, $D = D_M + D_W$. Più precisamente, D_M viene determinato considerando la sola dipendenza di n_1 da λ nel nucleo, mentre D_W dipende dalla geometria della fibra e da entrambi i valori di n_1 e n_2 . E', allora, possibile agire sulla geometria della guida e su n_2 riducendo D_W , in modo da ottenere fibre per le quali la λ_{ZD} si sposta intorno a $1,55 \mu\text{m}$. Questo tipo di fibre vengono indicate come fibre a dispersione traslata (o spostata), indicata nella precedente figura come D_S .

→ Attenuazione lineare:

Nell'analisi condotta fino a questo momento è stata sempre trascurata la possibilità che potesse essere presente un fenomeno di perdita durante la propagazione all'interno del nucleo. Non si è tenuto conto che il segnale luminoso, durante la propagazione guidata, subisce una attenuazione che può essere ricavata dalla seguente equazione differenziale:

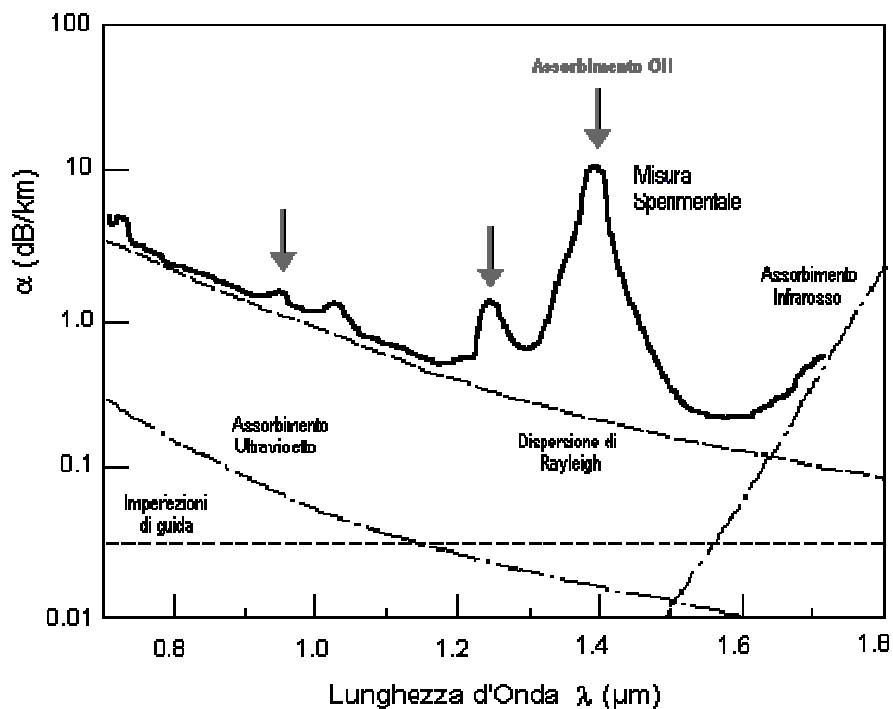
$$\frac{dP(z)}{dz} = -\alpha P(z)$$

dove, evidentemente, $P(z)$ indica la potenza di segnale su di una sezione trasversale del nucleo, α è il coefficiente di attenuazione e si è assunto che si abbia un decadimento di potenza esponenziale in confronto della lunghezza di fibra percorsa.

Il coefficiente di attenuazione, normalmente espresso in dB/km rispetto alla lunghezza L espressa in chilometri, può scriversi come:

$$\alpha = -\frac{1}{L} 10 \log(P(L) / P(0))$$

Le prime fibre fabbricate erano caratterizzate da un coefficiente α intorno ai 1000 dB/km e, quindi, non ne consentivano l'uso pratico. L'americana Corning Inc., nel 1970, mise a punto un sistema di fabbricazione (OVD) che consentì di produrre fibre ottiche con $\alpha=20$ dB/km quando $\lambda = 0,85\mu\text{m}$. Attualmente per le fibre convenzionali in materiale vetroso si arriva ad $\alpha=0,15$ dB/km quando $\lambda = 1,55\mu\text{m}$ per una fibra monomodale. Da queste poche righe si intuisce che il coefficiente α è dipendente dalla lunghezza d'onda λ , anche in maniera forte, per il quale si è ricavato sperimentalmente il seguente andamento:



In cui si nota un minimo assoluto intorno a $1,55\mu\text{m}$. Nella stessa figura si sono messi in evidenza, a tratto discontinuo, i diversi contributi che concorrono a determinare l'attenuazione totale.

Una frazione di $P(z)$ viene dissipata come calore a causa di due fenomeni: l'assorbimento intrinseco e l'assorbimento estrinseco. Il primo è causato dalla struttura del materiale che costituisce la fibra ed è dovuto a picchi di assorbimento nell'ultravioletto che si estendono fino alle lunghezze d'onda di interesse e a fenomeni analoghi nel campo dell'infrarosso lontano (in figura le due curve a tratto-punto). Questi due fenomeni sono minimizzabili variando la composizione chimica del materiale costituente il nucleo ed il mantello e, comunque, non risultano rilevanti per $\lambda < 1.6\mu\text{m}$. Il secondo tipo di assorbimento è dovuto alla presenza di impurità metalliche nel vetro e, in particolare, di gruppi ioni ossidrilici (OH) intrappolati nel reticolo vetroso. I gruppi OH sono prodotti dalla contaminazione con vapore acqueo del materiale durante la lavorazione e sono la fonte più rilevante di assorbimento estrinseco.

Il livello di attenuazione prodotto da tali ioni può essere limitato considerevolmente, riducendone la concentrazione a meno di una parte su 10^7 .

Un secondo meccanismo di attenuazione, dovuto alle disomogeneità del materiale provocate dal processo di raffreddamento della fibra, è il cosiddetto fenomeno di diffusione. Tali disomogeneità si ritrovano come una variazione microscopica di n nella fibra e, a causa di essa, una parte di $P(z)$ si disperde in modi secondari di propagazione che si esauriscono rapidamente. Questo fenomeno viene chiamato diffusione di Rayleigh e prevede che il coefficiente di attenuazione α_R sia proporzionale all'inverso della quarta potenza della lunghezza d'onda. Il coefficiente di proporzionalità per il vetro, indicato come C , è compreso tra 0,7 e 0,9(dB/km)/ $(\mu\text{m})^4$. La diffusione di Rayleigh è una sorta di limite al di sotto del quale l'attenuazione totale non può scendere ed è minimizzabile lavorando a lunghezze d'onda quanto più alte possibile, prima che si presenti l'assorbimento infrarosso. Ulteriori fonti di attenuazione sono dovute alle imperfezioni di guida (piegature della fibra) e vengono indicate solitamente come assorbimento di guida d'onda. Queste imperfezioni si possono dividere in macro piegature e micro piegature, in cui le prime sono generalmente trascurabili mentre le seconde sono più rilevanti e vengono introdotte durante la filatura della fibra. Le micro piegature possono peggiorare la qualità delle fibre, sia monomodo sia multimodo, e l'effetto può essere minimizzato, soprattutto nel primo caso, assicurando il funzionamento della fibra nelle vicinanze del valore di V che garantisce il massimo confinamento nel nucleo (2.405).

→ Attenuazione non lineare:

Nel caso in cui si abbia una fibra monomodo e la potenza $P(z)$ associata al segnale raggiunge valori al di sopra di 0dBm (corrispondente a 1mW), l'intensità del campo all'interno del nucleo può essere causa dell'insorgere di fenomeni non lineari. In questo caso non è più possibile utilizzare il metodo di sovrapposizione degli effetti per il calcolo del campo elettromagnetico ed, inoltre, insorgono nuove fonti di perdita di potenza per il segnale normalmente trascurabili. Nella diffusione di Rayleigh, detta anche diffusione elastica, si ha attenuazione per l'insorgere di modi superiori che si dissipano localmente. I fenomeni non lineari, detti diffusioni anelastiche, sono principalmente due e prendono il nome di diffusione di Raman e di diffusione di Brillouin.

Questi tipi di diffusione sono caratterizzati dal fatto che il materiale assorbe alla lunghezza d'onda λ_0 a cui avviene la trasmissione un fotone, e ne emette un altro ad una lunghezza d'onda maggiore, con energia ridotta. Evidentemente per l'equilibrio energetico si ha anche l'emissione di un fonone, che si disperde per energia meccanica in vibrazione del reticolo. Il segnale utile λ_0 viene, quindi, privato dell'energia associata al fotone assorbito (attenuazione) e viene creata una componente alla lunghezza d'onda λ' (minore di λ_0), che non era presente precedentemente (conversione di frequenza). Nella diffusione di Brillouin la potenza sottratta al segnale in λ_0 crea due bande laterali con lunghezze d'onda a cavallo di λ_0 e separate da una frequenza ricavabile dall'energia associata al fonone emesso.

L'effetto Brillouin diventa sensibile quando la potenza del segnale, in una fibra monomodo, varia tra 1 e 10mW e risulta inversamente proporzionale alla sezione del nucleo e al quadrato di λ . Per la diffusione Raman si possono fare considerazioni molto simili a quelle ora descritte, con la differenza, in questo caso, che alla creazione di fotoni aventi λ diverse si accompagna l'emissione di fononi a frequenze ottiche. Poiché la diffusione Raman si presenta quando la potenza ottica associata al segnale è dell'ordine del Watt (+30dBm), nelle comuni applicazioni può essere trascurata.

L'effetto Kerr è un altro effetto non lineare, dovuto al fatto che l'indice di rifrazione viene a dipendere dall'intensità del campo elettromagnetico associato al segnale (rifrazione non lineare), ovvero $n = n(P)$. A causa dell'effetto Kerr l'involuppo di un pacchetto d'onda con un'ampiezza di picco elevata può essere fortemente distorto.

Senza scendere in ulteriori dettagli, l'indice di rifrazione in regime non lineare può essere espresso come:

$$n'(f_0) = n(f_0) + \bar{n}_2(P/A)$$

Processi di fabbricazione:

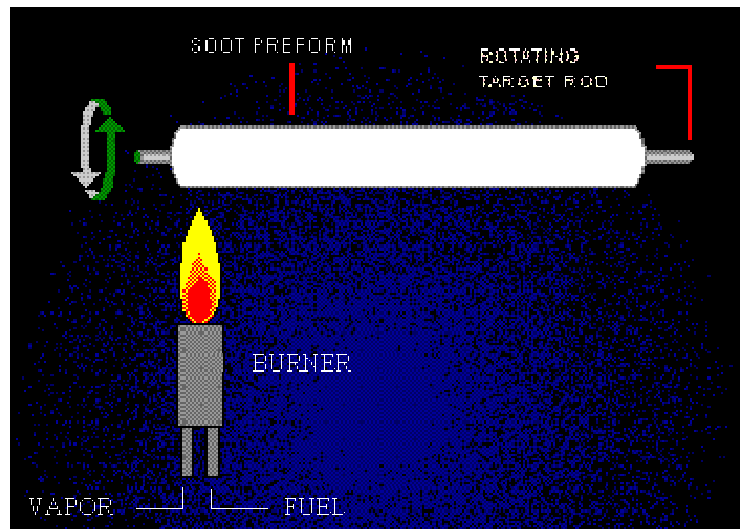
Nelle applicazioni per le quali l'attenuazione e la dispersione non sono parametri rilevanti come, ad esempio, piccole tratte per trasmissione dati o reti locali in fibra ottica, le fibre vengono realizzate in plastica monocristallina multimodo a nucleo largo. Ciò consente di garantire una apertura numerica elevata, migliorando l'efficienza di accoppiamento e di facilitare le giunzioni ed i cablaggi, mentre la brevità delle tratte consente di tollerare la forte dispersione. Tutti gli altri tipi di fibra sono realizzate con materiale vetroso con l'aggiunta di droganti per variare l'indice di rifrazione del nucleo e del mantello.

→ Preforma e tecniche di realizzazione:

La prima fase della fabbricazione di una fibra è la costituzione di una preforma, ovvero un cilindro della lunghezza di un metro e del diametro di pochi centimetri, costituita da due strati di materiale vetroso purificato. Lo strato più interno è destinato a diventare il nucleo e, quello più esterno, il mantello, durante la filatura della preforma stessa, che descriveremo più avanti. La preforma è, quindi, di diametro maggiore della fibra che da essa si ottiene; viene ricavata con varie tecniche di lavorazione dai materiali grezzi e deve contenere al suo interno sia il nucleo che il mantello.

La prima tecnica usata per la fabbricazione della preforma è stata la deposizione di vapore esterna (OVD, Outside Vapor Deposition), nella quale si ha un processo di idrolisi a fiamma, in cui il vetro viene depositato lateralmente su di un'anima rotante, in forma di fuliggine generata bruciando vapori di SiCl_4 con una fiamma alimentata ad ossigeno puro.

La fiamma viene fatta traslare lateralmente (avanti e indietro) per depositare strati successivi di vetro, fino ad ottenere lo spessore desiderato dello strato relativo al nucleo e, successivamente, quelli relativi al mantello.



La variazione dell'indice di rifrazione è ottenuta aggiungendo al materiale grezzo dei droganti che vengono vaporizzati e depositati nella concentrazione desiderata.

Una variante di questa tecnica è la deposizione di vapore assiale (VAD, Vapor Axial Deposition), in cui si ottiene una lavorazione continua, e non a lotti mediante la preforma. La lavorazione continua si ottiene lavorando la preforma in senso verticale con deposizione assiale dei materiali grezzi sull'estremo inferiore, mentre essa viene continuamente tratta verso l'alto.

Successivamente è stata messa a punto una tecnica migliore, detta deposizione chimica di vapore modificata (MCVD, Modified Chemical Vapor Deposition), nella quale non c'è diretto contatto tra la fiamma e la preforma. In questo tipo di tecnica la deposizione del materiale vetroso avviene all'interno di un tubo di vetro e, quindi, si richiede prima la deposizione del mantello e poi del nucleo. Anche in questo caso il tubo viene fatto ruotare e la fiamma si sposta lungo l'asse del tubo, per garantire l'uniformità della deposizione, inoltre per variare spessore e indice di rifrazione si variano le concentrazioni dei droganti. Il vantaggio della tecnica MCVD, rispetto alle precedenti, consiste nel fatto che il deposito degli strati avviene in ambiente chiuso in cui è possibile controllare la pulizia dell'ambiente da impurità, con particolare attenzione ai gruppi ossidrilici OH. Una variazione di questa tecnica è la PCVD (Plasma-activated Chemical Vapor Deposition) nella quale la deposizione degli strati viene indotta con reagenti in fase di plasma. Questo consente di ottenere strati più fini lavorando a temperature più basse e permette di controllare con maggior precisione l'indice di rifrazione.

→ Filatura della preforma:

A partire dalla preforma, ottenuta con uno dei metodi visti, si ottiene la fibra vera e propria mediante un apparato di filatura. La preforma viene riscaldata in una fornace ad induzione, acquistando un certo grado di viscosità, mentre le pareti a imbuto al di sotto della zona calda fanno sì che la parte cava della preforma collassi formando il nucleo e il mantello. La fibra assume il diametro finale in questa fase della lavorazione, in cui la forza di trazione viene variata in funzione delle indicazioni di diametro fornite da un sensore sensibile alle figure di interferenza della luce, generata da un laser, che attraversa la fibra.

Sempre durante la filatura, la fibra viene rivestita con materiali polimerici per proteggerla da agenti esterni e irrobustirla meccanicamente. Per garantire un grado di robustezza adatto all'impiego a cui è destinata la fibra, la si ricopre con un rivestimento secondario che evita anche il fenomeno delle micropiegature che può portare ad un aumento del coefficiente di attenuazione della fibra. Esistono molti tipi di rivestimenti secondari in funzione delle applicazioni a cui è destinata la fibra.

Tipi e usi delle fibre ottiche:

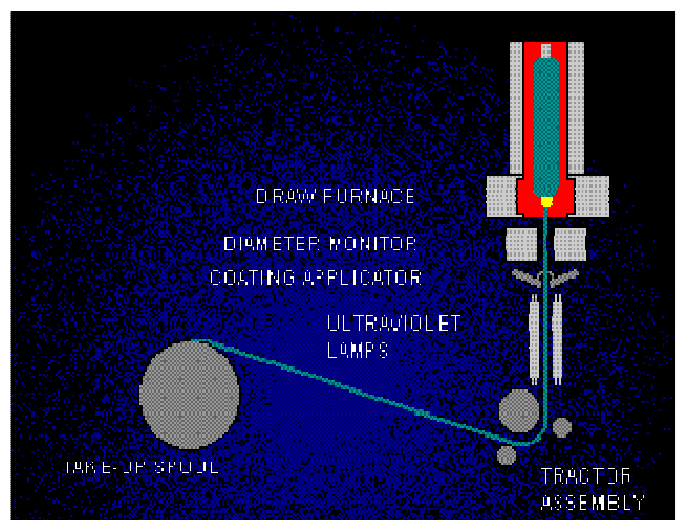
Per una Long Haul Network la fibra che viene usata più comunemente è quella che opera a 1550nm con gli amplificatori EDFA(Erbium fiber Doped Amplifiers).

Ci sono tecnologie di amplificazione simili anche per i sistemi di fibre a 1310 e 850nm. Queste fibre vengono generalmente usate in area metropolitana o nei campus dove non è richiesta l'amplificazione ottica e dove quella elettrica è poco costosa.

Ci sono tre tipi di fibre che operano a 1550nm : NDSF(No dispersion shifted fiber), DSF (dispersion shifted fiber), NZDSF (non-zero dispersion shifted fiber). Questo ultimo tipo di fibra è ora l'alternativa preferita per i sistemi che scelgono l'impiego del WDM.

Con l'avvento di WDM i costruttori di fibre scoprirono che l'ottimizzare una singola lunghezza d'onda ha un effetto negativo sulla trasmissione WDM in particolare su quelle lunghezze d'onda che sono distanti dalla lunghezza d'onda centrale. Questo è dovuto alla dispersione cromatica del III ordine perché la velocità di propagazione delle varie lunghezze d'onda è diversa. Ora le fibre ottiche hanno un profilo di dispersione non nullo per limitare l'effetto del FWM (Four Wave Mixing).

Oggi ci sono fibre che permettono bit-rate nel campo da 40 a 80Gbps tramite la combinazione di un largo numero di lunghezze d'onda a 2.5Gbps o 10Gbps. Generalmente c'è un punto di contatto tra la capacità individuale di ciascuna lunghezza d'onda e il numero di lunghezze



d'onda così che la capacità dell'intera fibra non si può cambiare nonostante ciascuna lunghezza d'onda può essere trasmessa a 10 o 2Gbps.

Le lunghezze d'onda a 10Gbps generalmente richiedono uno spettro più ampio rispetto ai sistemi a 2.5Gbps. Comunque, il grande svantaggio dei data-rate elevati sulle singole lunghezze d'onda è la necessità di uno spazio più vicino per gli amplificatori ottici. La dispersione della fibra ha un impatto significativo sullo spazio e il numero degli amplificatori ottici e i rigeneratori elettrici. I sistemi a fibra oggi richiedono amplificatori ottici o EDFA ogni 50–100Km.

Le fibre possono essere connesse in tre modi diversi:

–Primo: possono terminare in connettori ed essere inserite in prese per fibre. I connettori perdono circa 9–10dB di luce, ma semplificano la riconfigurazione del sistema.

–Secondo: possono essere unite meccanicamente. Le giunzioni meccaniche poggiano accuratamente le due estremità una vicina all'altra in un manica speciale e le stringono insieme. L'allineamento può essere migliorato facendo passare la luce attraverso la giunzione e quindi facendo piccoli aggiustamenti per massimizzare il segnale.

Le giunzioni meccaniche richiedono circa cinque minuti al personale addestrato e risultano avere una perdita del 10 % di luce.

–Terzo: due pezzi di fibra possono essere fusi per formare una connessione solida. Una giunzione di fusione è tanto buona quanto una singola fibra tirata dritta, ma anche qui c'è una piccola attenuazione.

Per tutti e tre i tipi di giunzione, ci può essere riflessione nel punto di giunzione e l'energia riflessa può interferire col segnale.

I SISTEMI OTTICI DI TRASMISSIONE

Evoluzione dei sistemi ottici di trasmissione:

Un parametro per esprimere quantitativamente la capacità di un sistema di comunicazione, è il prodotto bit rate–distanza, BL, dove B indica il bit rate del segnale e L la distanza tra i ripetitori. I migliori sistemi di comunicazione a microonde, disponibili negli anni '70, erano caratterizzati da BL intorno ai 100(Mb/s)Km.

Per ottenere sistemi caratterizzati da BL superiori, era necessario passare ad una tecnologia diversa: nasce l'era delle comunicazioni ottiche.

Il segnale ottico, infatti, presenta una frequenza portante dell'ordine dei 100THz e, considerando il fatto che il segnale dati può avere una occupazione di banda di qualche unità percentuale rispetto alla portante (1–2%), si comprende come sia teoricamente possibile realizzare sistemi ottici di comunicazione caratterizzati da una banda disponibile molto elevata, superiore ad 1THz. I sistemi a microonde, che utilizzano portanti dell'ordine dei 10GHz, permettono la realizzazione di sistemi con una banda di circa 100 MHz, un valore decisamente inferiore rispetto a quello possibile con l'utilizzo dei sistemi ottici.

Nel 1960 fu messa a punto la prima sorgente ottica coerente: il laser. Per trasmettere la luce su grandi distanze, vennero messe a punto le prime fibre ottiche, le quali erano, tuttavia, caratterizzate da una perdita notevolissima: 1000dB/Km. Le fibre messe a punto negli anni '70 riuscivano a contenere le perdite a circa 20dB/Km, utilizzando segnali di luce con una lunghezza d'onda intorno al μm . Lo sviluppo simultaneo di sorgenti laser compatte ed economiche e di fibre ottiche a basse perdite, portarono ad uno sviluppo portentoso dei sistemi di comunicazione ottici, a costi sempre più contenuti.

Negli ultimi 30 anni il progresso tecnologico in questo campo è stato molto rapido, ed ha portato ad un miglioramento del prodotto BL di qualche ordine di grandezza. E' possibile schematizzare l'evoluzione dei sistemi di comunicazione ottica in cinque generazioni:

Prima generazione: realizzati alla fine degli anni '70, questi sistemi operavano su una lunghezza d'onda di 0.8 μm , e permettevano sistemi con bit rate di 45 Mb/s con una spaziatura dei ripetitori di circa 10 Km.

Seconda generazione (1.3 μm): realizzati nei primi anni '80, questi sistemi operavano su una lunghezza d'onda di 1.3 μm , in corrispondenza della quale le perdite della fibra sono inferiori al dB/Km. I primi sistemi utilizzavano fibre multimodo e soffrivano di limitazioni a causa della dispersione intermodale. I sistemi successivi utilizzavano fibre singolo modo, e permettevano la realizzazione di sistemi che operavano a bit rate superiori a 1.7Gbit/s, con una distanza tra i ripetitori di circa 50 Km.

Terza generazione (1.55 μm): realizzati commercialmente nel 1990, questi sistemi operano su una lunghezza d'onda di 1.55 μm , in corrispondenza della quale si ottengono perdite in fibra dell'ordine di 0.2dB/km. Per limitare i problemi derivanti dalla dispersione, vengono utilizzate due tecniche: fibre a dispersione traslata, in cui la dispersione nulla viene portata intorno a 1.55 μm , e sorgenti che operano su un singolo modo longitudinale.

I sistemi che utilizzano queste tecnologie, sono in grado di operare a bit rate superiori a 4Gbit/s, con distanze tra i ripetitori di oltre 100 Km. La rigenerazione avviene in maniera elettroottica: il segnale ottico che viaggia nella fibra viene rilevato da un fotorivelatore, viene tradotto in segnale elettrico per le successive elaborazioni all'interno del rigeneratore, e viene infine utilizzato per modulare una sorgente di luce, per trasmettere nuovamente il segnale ottico nella fibra.

Quarta generazione (amplificatori ottici): questi sistemi fanno uso di amplificatori ottici per incrementare la distanza tra i ripetitori, e utilizzano la tecnica della moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda (WDM) per incrementare il bit rate. Gli amplificatori ottici sono, infatti, in grado di amplificare contemporaneamente tutti i canali utilizzati nella trasmissione WDM.

Utilizzando amplificatori in fibra drogata d'erbio (EDFA) lungo il collegamento, nei primi anni '90 si riuscirono a realizzare in laboratorio sistemi con bit rate di 5Gbit/s su distanze complessive di 14300 Km. Questi sistemi sono quindi in grado di soddisfare le esigenze delle comunicazioni transoceaniche. Nel 1996 venne dimostrato in laboratorio un sistema di comunicazioni che utilizzava venti canali a 5Gbit/s, su una distanza di 9100 Km, dando luogo ad un sistema caratterizzato da un fattore BL di 910 (Tb/s)Km.

Quinta generazione (gestione di solitoni e dispersione): utilizzando i sistemi a solitoni, si sono potute raggiungere capacità a singolo canale fino a 20 Gb/s su distanze transoceaniche. Oggi mediante la tecnica WDM la gestione della dispersione, che è la tecnica basata sulla compensazione periodica della dispersione cromatica, si sono raggiunte capacità del Terabit al secondo su distanze transoceaniche.

Per il futuro si intravedono grosse possibilità per la realizzazione di reti tutte ottiche. Inoltre capacità ancora più elevate si otterranno con l'introduzione dei rigeneratori tutto ottici.

Schema a blocchi di un sistema ottico di trasmissione:



Analizzando lo schema precedente, si può osservare come esso sia concettualmente simile a qualsiasi sistema di comunicazione: la differenza principale risiede nel canale di comunicazione (normalmente la fibra ottica), e di conseguenza il trasmettitore e il ricevitore devono essere progettati per operare con questo tipo di canale. I sistemi di comunicazione ottica possono essere schematicamente divisi in due categorie: sistemi guidati e sistemi non guidati. Quest'ultima categoria di sistemi utilizza lo spazio libero per la propagazione del segnale: a causa del deterioramento del segnale nel transito nell'atmosfera, e a causa delle grosse limitazioni che il mezzo pone per quanto riguarda la massima distanza di trasmissione (causati anche dalla notevole difficoltà di direzionalità del ricevitore), questo tipo di sistemi non sono molto utilizzati. I sistemi guidati, sono invece molto utilizzati nelle applicazioni pratiche e si basano su fibra ottica per la trasmissione del segnale.

Descriviamo ora in dettaglio i vari componenti di un sistema ottico di trasmissione:

→ Trasmettitore ottico:

Il compito del trasmettitore ottico è quello di convertire il segnale elettrico applicato al suo ingresso in un segnale ottico idoneo ad essere trasmesso nella fibra. In un trasmettitore ottico è presente una sorgente ottica, un modulatore e un accoppiatore di canale.

Le sorgenti ottiche maggiormente utilizzate sono i LED (light emitting diodes) e i LASER, per il fatto che sono facilmente accoppiabili con la fibra ottica e presentano caratteristiche idonee alla trasmissione numerica. Il segnale ottico è generato modulando la portante ottica generata dalla sorgente ottica. Sebbene a volte si utilizzi un modulatore esterno alla sorgente per modulare la portante, spesso si preferisce modulare direttamente la sorgente ottica variando opportunamente la sua corrente di pilotaggio. Questa soluzione semplifica il progetto del trasmettitore, e ne rende più economica la realizzazione. L'accoppiatore di canale è tipicamente realizzato attraverso una microlente che focalizza il segnale ottico all'interno della fibra ottica, con la massima efficienza possibile. La potenza immessa nella fibra è una grandezza di progetto molto importante in quanto, conoscendo la potenza iniettata nella fibra e conoscendo le perdite introdotte da quest'ultima, è possibile calcolare la potenza che giunge al ricevitore, e quindi, considerando che esiste un legame tra la potenza ricevuta e la probabilità d'errore del ricevitore, quantificare le prestazioni dell'intero sistema di comunicazione.

Le prestazioni migliori si ottengono utilizzando il laser come sorgente ottica. E' preferibile utilizzare il led per applicazioni a basso costo e a basso bit rate.

→ Canale di comunicazione(fibra ottica):

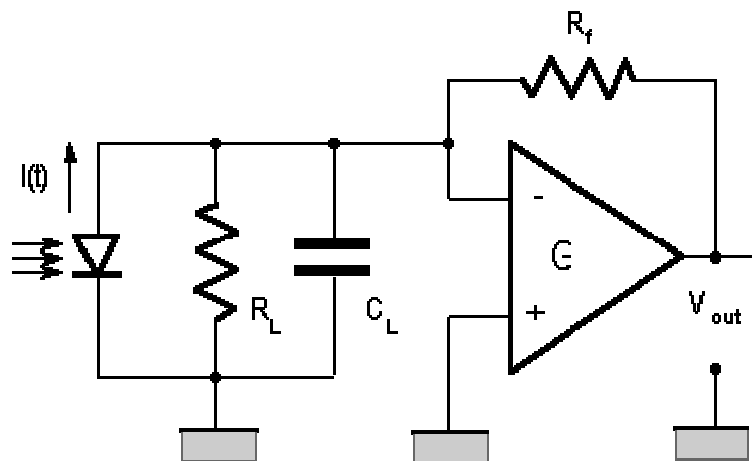
Il compito del canale di comunicazione è quello di trasportare il segnale dal trasmettitore al ricevitore apportando la minore distorsione possibile al segnale stesso.

La fibra si presenta come il candidato ideale a svolgere il ruolo di canale trasmissivo nelle comunicazioni ottiche, grazie al fatto che presenta delle perdite molto basse (come si è visto nel paragrafo introduttivo, recentemente sono state realizzate fibre con perdite inferiori o uguali ai 0.2dB/km). Le perdite nel canale trasmissivo, rivestono, infatti, un ruolo molto importante nel progetto del sistema di comunicazione, e rappresentano il primo aspetto da tenere in considerazione nella progettazione della lunghezza della tratta nei sistemi di comunicazione a grande distanza (cioè su distanze superiori ai 100 km). Se la fibra presenta delle perdite troppo elevate, la distanza del collegamento sarà, a parità di condizioni, ridotta. I meccanismi di assorbimento della fibra fanno sì che la fibra presenti tre finestre nelle quali si manifesta un minimo nelle perdite (0.82 μ m, 1.3 μ m e 1.55 μ m). Per fibre ad elevata purezza, il meccanismo dominante di perdita nelle finestre è dovuto allo scattering di Rayleigh, il quale, a parità di materiale utilizzato, ha un andamento inversamente proporzionale alla quarta potenza della lunghezza d'onda. Per questo motivo è conveniente, al fine di ottenere una trasmissione caratterizzata da basse perdite, utilizzare fibre nella terza finestra, cioè con lunghezza d'onda di 1.55 μ m, come avviene nei sistemi dell'ultima generazione. Un altro parametro, non meno importante del precedente, che bisogna considerare quando si realizza un sistema con fibre ottiche, è la dispersione introdotta dalla fibra: tale dispersione provoca l'allargamento degli impulsi ottici al di fuori del bit slot a loro

assegnato, e questo comporta un deterioramento del segnale, in quanto gli impulsi arrivano al ricevitore più o meno allargati e sovrapposti tra di loro (interferenza intersimbolo: ISI). I due parametri che quindi caratterizzano maggiormente le prestazioni della trasmissione in fibra ottica sono le perdite e la dispersione. Utilizzando sorgenti di luce con lunghezza d'onda intorno a $1.55\ \mu\text{m}$, il problema delle perdite diviene trascurabile, ma si accentua quello della dispersione. E' possibile, allora, utilizzare fibre particolari (fibre a dispersione traslata) appositamente progettate per presentare ridotti effetti dispersivi proprio in corrispondenza della lunghezza d'onda $1.55\ \mu\text{m}$.

→ Ricevitore ottico:

Il ricevitore ottico digitale ha il compito di convertire il segnale ottico ricevuto in un segnale elettrico e di determinare, osservando il segnale in un periodo di bit, quali tra i due possibili segnali sia stato trasmesso. Si sta, quindi, supponendo di utilizzare segnali binari. Lo schema generale di un ricevitore ottico è mostrato nella figura seguente:



Il segnale proveniente dalla fibra ottica, opportunamente focalizzato da un accoppiatore di canale, viene rilevato attraverso un fotorivelatore ad elevata impedenza (un diodo PIN oppure APD); il segnale elettrico di basso livello così ottenuto viene amplificato utilizzando un amplificatore a basso rumore, determinante per ottenere buone prestazioni in termini di rumore dell'intero ricevitore. Segue poi l'amplificatore principale, che è dotato di sistema di controllo automatico del guadagno in modo da pilotare gli elementi seguenti del ricevitore ai livelli ottimali. Segue poi il blocco logico che si occupa della RIGENERAZIONE DEL SEGNALE: si tratta di un dispositivo che ha il compito di recuperare il segnale di clock dal segnale che ha al suo ingresso, seguito da una porta logica di decisione; in questo modo il segnale è campionato negli istanti appropriati. Il segnale digitale seriale così ottenuto viene poi convertito in segnale parallelo, che viene poi demultiplato per ottenere segnali a più basso bit rate, e viene poi inviato al resto del sistema.

Optical transport network(OTN):

Con l'OTN (Optical Transport Network) si persegue l'obiettivo di eliminare i punti di debolezza della gerarchia di rete SDH(Synchronous Digital Hierarchy) quali difficoltà di avere una buona concatenazione tra le varie AU(administrative unit) e spreco di banda disponibile, l'OTN fa quindi allo stesso tempo, un ulteriore passo verso una rete tutta ottica; le caratteristiche della OTN sono ormai ben definite in una serie di Raccomandazioni ITU-T.

Una OTN è composta da un insieme di elementi di rete ottici ONE (Optical Network Element), connessi da collegamenti in fibra ottica, atti a fornire funzionalità di trasporto, moltiplicazione, instradamento, gestione, supervisione di canali ottici che trasportano segnali, con un trattamento eseguito predominantly(prevalentemente) in regime fotonico.

Il termine predominantly chiarisce che la OTN non è una rete tutta ottica. I punti qualificanti della OTN sviluppati nel seguito sono: l'architettura, la gerarchia dei canali ottici, la loro trama e una certa trasparenza ottica.

L'architettura della rete OTN è strutturata su tre livelli: canale ottico, sezione di moltiplicazione dei canali ottici, sezione di trasmissione (tra terminali e/o tra amplificatori ottici adiacenti). Ciascuno di questi tre livelli ha precisi obiettivi nel quadro generale del controllo e della gestione.

Per il trasporto di segnali cliente, l'OTN definisce tre tipologie di contenitori: la prima (ODU-1) adatta a trasportare segnali cliente con velocità fino a 2,5Gbit/s; la seconda (ODU-2) per segnali da 2,5 a 10Gbit/s; la terza (ODU-3) per segnali da 10 a 40Gbit/s. Tali tipologie di contenitori costituiscono anche gli elementi di una gerarchia ottica OTH (Optical Transport Hierarchy) che consente il trasporto di quattro ODU-1 in un ODU-2 e di quattro ODU-2 in un ODU-3, nonché diverse altre combinazioni di canali.

Segnali cliente di ogni tipo (IP, ATM, Ethernet, STM-N) possono essere mappati in questi contenitori: all'ingresso della rete è previsto che i trasponder, oltre ad assegnare al canale ottico la giusta lunghezza d'onda, provvedano anche ad inserire i singoli segnali nei canali ottici (a seconda, naturalmente, della capacità che essi hanno, in modo da ottenere il massimo rendimento) e a completare con cifre di riempimento la parte della trama che rimane libera. Questa caratteristica della OTN garantisce un'elevata trasparenza ai segnali cliente all'interno del canale ottico prescelto. La trama di ciascuno dei tre tipi di canale è costituita da un payload, nel quale sono mappati i dati, e da un overhead, dove sono contenute tutte le informazioni necessarie per la gestione delle configurazioni e degli allarmi, nonché per il controllo delle prestazioni. Con canali ottici OTN così strutturati (payload + overhead) si supera il vincolo dell'impiego del livello SDH, in quanto ciascun canale ottico è dotato di tutte le risorse necessarie per la propria gestione.

I segnali dati di un cliente possono essere quindi immessi e trasportati sui canali ottici senza dover essere prima mappati nelle trame SDH. D'altra parte i canali cliente SDH possono trovare posto nei canali ottici al pari dei segnali dati.

Una caratteristica della OTN è la trasparenza ottica, cioè la capacità della rete di trasportare segnali ottici su lunghe distanze e attraverso i suoi nodi senza necessità di conversioni O/E e E/O. Questa trasparenza non è assoluta per via di diverse limitazioni (che rendono conto della parola predominantly posta nella definizione) dovute sia al già citato accumulo delle degradazioni nella trasmissione ottica sia al fatto che non tutte le funzionalità di rete possono al momento essere svolte al livello ottico.

La tecnologia rende infatti disponibili oggi apparati per la derivazione e per l'introduzione di canali ottici OADM (Optical Add Drop Insert Multiplexer), ma per i ripartitori ottici PXC (Photonic Cross-Connect) la situazione è più articolata.

I PXC attualmente sul mercato hanno infatti ancora caratteristiche insufficienti per un loro estensivo impiego in rete sotto l'aspetto dell'affidabilità, dell'ingombro, del consumo e soprattutto, del costo. Dal punto di vista della trasparenza ottica, l'OTN si presenta quindi come costituita da un insieme di isole ottiche trasparenti di dimensioni limitate (100–200 km), all'interno delle quali i canali ottici sono sempre mantenuti al livello ottico, collegate tra loro da rigeneratori 3R (per eliminare le degradazioni accumulate) e/o da permutatori per canali ottici, che effettuano tuttavia le permutazioni al livello elettrico.

Passive optical network:

Presentiamo ora una panoramica riguardante le Reti Ottiche Passive PON (Passive Optical Networks), una delle principali tecnologie su fibra ottica adatta al segmento di rete di accesso. In particolare viene effettuata un'analisi della tecnologia, degli aspetti sistemistici, architetturali e della normativa di settore esistente, con un quadro delle principali sperimentazioni ed applicazioni realizzate nel mondo.

Le soluzioni PON offrono l'opportunità di conseguire significativi vantaggi economici per l'elevato grado di condivisione delle infrastrutture, fibra e apparati, soprattutto lato rete, e per la possibilità di eliminare elementi attivi nel segmento di rete di distribuzione ottica. Dall'analisi effettuata emergono numerosi punti d'interesse relativi all'impiego e alle prospettive di questa tecnologia.

L'opportunità di introdurre le tecnologie ottiche nel segmento di rete di accesso costituisce, per tutti gli operatori, una possibile risposta alla sempre crescente richiesta di servizi sia da parte dell'utenza affari (grandi e medie imprese) sia nei segmenti più bassi di clientela (piccole imprese, clienti residenziali). I servizi di interesse, in questo contesto, vanno ben al di là dell'esigenza di classica connettività vocale, e comprendono la connettività dati per accesso ad Internet ad alta velocità, il commercio elettronico, i servizi di teleconferenza e telemedicina, fino a comprendere i servizi video (broadcast e on demand). Questi servizi, oltre ad altri che saranno proposti in un prossimo futuro, hanno la caratteristica di essere particolarmente band consuming e richiedono pertanto l'impiego di adeguate tecnologie abilitanti per poter essere offerti ad un livello di costo che li rendano attraenti ad un bacino di utenza il più ampio possibile.

Nel segmento di rete di accesso la larga diffusione e capillarità della classica rete di distribuzione in rame, sviluppata per il servizio telefonico, ha indotto fino ad oggi tutti gli operatori a sfruttare il più possibile l'ingente patrimonio infrastrutturale disponibile, introducendo vari sistemi trasmissivi della famiglia xDSL(x Digital Subscriber Loop); tale strategia, sicuramente efficace nel breve e medio periodo, non può tuttavia prescindere dalla sempre crescente richiesta di banda e dall'inevitabile futura obsolescenza della rete in rame, soprattutto nel cablaggio di nuovi insediamenti. Questo spiega il crescente interesse da parte degli operatori di rete e dei costruttori di apparati verso soluzioni che prevedono l'impiego di tecnologie ottiche in rete di accesso.

Il problema principale nell'introduzione della fibra ottica in rete d'accesso è rappresentato dal costo dell'infrastruttura stessa, in particolare per quanto riguarda gli scavi, la posa delle tubazioni e dei cavi, le opere di ripristino; tale costo potrebbe essere dilazionato nel tempo per esempio, posando la fibra nelle zone di nuova urbanizzazione nei casi di manutenzione e/o sostituzione dei cavi in rame deteriorati.

Tra le possibili architetture che fanno uso della fibra, quelle che si basano su soluzioni punto-multipunto PON, presentano alcuni vantaggi che le rendono convenienti rispetto alle soluzioni punto-punto, quali:

- una affidabilità elevata rispetto a soluzioni a stella attiva con apparati attivi "in strada"
- la manutenzione semplificata
- la riduzione del numero di fibre in centrale e del costo per utente
- la possibilità di evoluzione mediante la sola sostituzione degli apparati terminali.

Tuttavia, come si vedrà nel seguito, parte di questi vantaggi possono andare perduti in funzione delle architetture di rete adottate. Per contro queste soluzioni presentano alcuni aspetti di criticità, soprattutto da un punto di vista tecnologico, come la complessità derivante dalla necessità di adottare tecniche di multiplazione, trasmissione e ricezione molto sofisticate.

Le specifiche di questi sistemi, a cui i prodotti attualmente sul mercato si attengono, sono state concepite da un organismo detto FSAN(Full Service Access Networks) composto da ben ventuno tra i più importanti operatori di TLC a livello mondiale, che individuano e definiscono i meccanismi ritenuti indispensabili per una rete di TLC dal punto di vista degli operatori. Tali meccanismi comprendono la gestione ed il controllo della QoS opportuna, la gestibilità, la configurabilità e l'interoperabilità di apparati tra diversi fornitori.

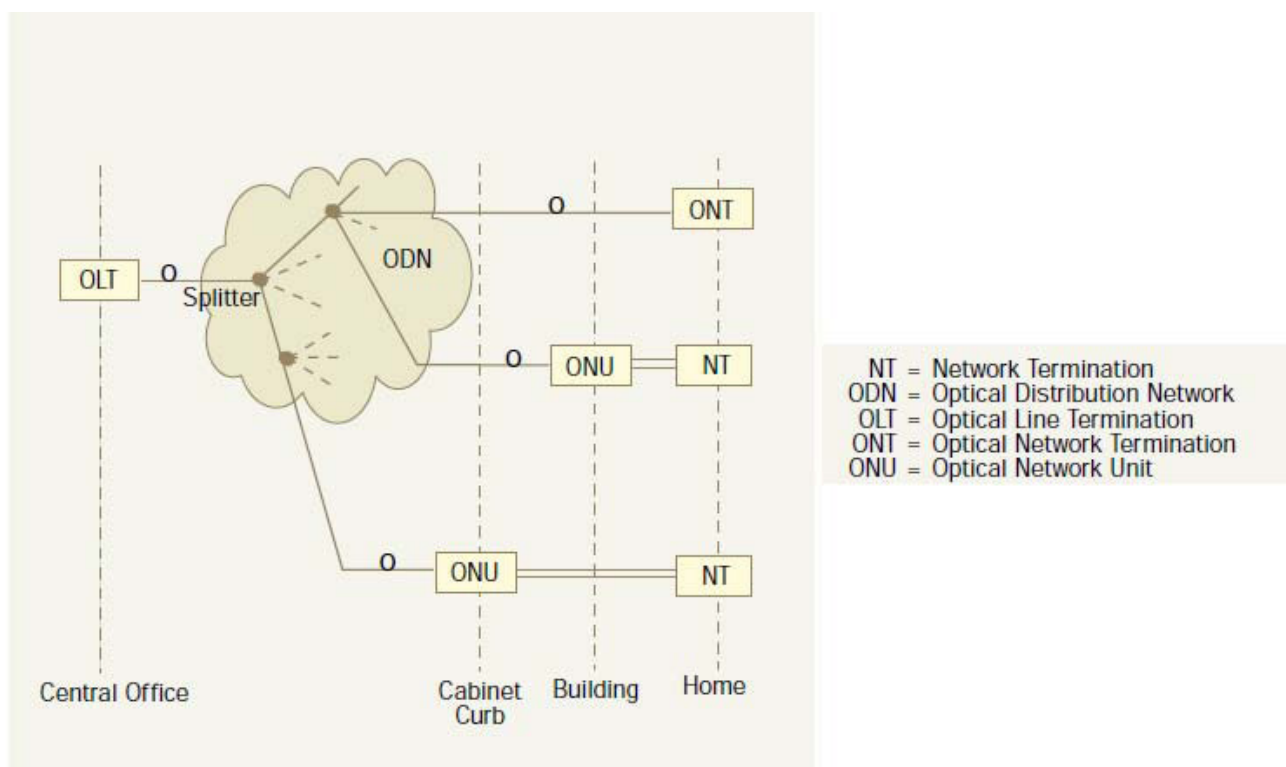
Le attività svolte in FSAN, i cui risultati sono stati proposti e sostanzialmente recepiti in ambito ITU-T nelle Raccomandazioni pertinenti, sono state condotte con il pieno supporto dei costruttori che stanno dando il massimo per rendere gli apparati particolarmente attraenti. In alcuni Paesi l'impiego delle soluzioni PON rappresenta già oggi una realtà. È, ad esempio, il caso del Giappone dove, già a partire dal 1998, è iniziata l'introduzione commerciale di soluzioni FTTH (Fiber To The Home) basate su soluzioni PON. Sono numerosi gli operatori che adottano tali soluzioni. A fine 2003 erano 960mila gli utenti connessi, con un tasso percentuale di crescita superiore a quello dell'ADSL.

Negli Stati Uniti le soluzioni PON sono ad oggi impiegate in particolare da piccoli operatori locali o da municipalità che realizzano piani di cablaggio ottico per piccole comunità. A fine 2003 erano circa 180mila le abitazioni “passate” di cui circa 100mila risultavano connesse. Nel corso del 2003 tre dei quattro operatori incumbent degli Stati Uniti e cioè Verizon, BellSouth ed SBC hanno avviato e concluso una RfP (Request for Proposal) per soluzioni del tipo FTTH-FTTB (Fiber to the Home-Fiber to the Building) basate su PON. Nel corso del 2004 sono previsti i primi field trials e le prime applicazioni in determinate situazioni, quali ad esempio le aree green field.

La prevedibile evoluzione dei sistemi PON comporterà la possibilità di supportare nuove potenzialità, quali le tecniche di WDM (Wavelength Division Multiplexing) acquisendone i vantaggi di ampliamento della capacità disponibile per singola fibra.

Soluzioni PON:

Una rete ottica passiva (PON) è una rete di accesso caratterizzata dall'assenza di apparati attivi al di fuori delle sedi ove sono collocate le OLT (Optical Line Termination) e le ONT-ONU (Optical Network Termination-Optical Network Unit). È in genere basata su topologie di rete ad albero, realizzate mediante l'uso di ripartitori ottici di tipo passivo. La struttura generale di una rete PON è rappresentata nella seguente figura:



→ Terminazioni di linea ottica(OLT, ONU):

OLT:

Sul lato rete è presente la terminazione di linea ottica (OLT) che tipicamente si trova in un punto di raccolta, quale una centrale, e funziona da interfaccia condivisa tra tutti gli utenti connessi e la rete core. Una OLT comprende i seguenti blocchi funzionali:

- Core shell: questa sezione comprende le interfacce verso la rete e di distribuzione ottica (ODN Interface Function), la funzione di moltiplicazione di trasmissione (Transmission Multiplexing Function) e quella di permutazione (Digital Cross Connect Function).
- Service shell: comprende le interfacce dei tributari (Tributary Interface Function) e le funzioni di elaborazione della segnalazione (Signalling processing Function).
- Common shell: comprende le funzioni di elaborazione delle informazioni di gestione, manutenzione e controllo (OAM Function), oltre a quella di alimentazione della OLT (Power supply Function).

ONU:

L'utente accede ai servizi offerti dalla rete tramite la terminazione di rete ottica (ONT o ONU) che contiene i seguenti blocchi funzionali:

- Core shell: comprende l'interfaccia verso la rete di distribuzione ottica (ODN Interface Function), la funzione di moltiplicazione di trasmissione (Transmission Multiplexing Function) e quella di moltiplicazione di utenti e servizi (Customer and Services Multiplexing Function);
- Service shell: comprende le interfacce dedicate ai differenti servizi supportati (Service Interface Function);
- Common shell: comprende le funzioni di elaborazione delle informazioni di gestione, manutenzione e controllo (OAM Function), oltre a quella di alimentazione della ONU (Power supply Function).

Le OLT e le ONU sono connesse dalla rete di distribuzione ottica ODN (Optical Distribution Network) in configurazione punto–multipunto che può essere realizzata con uno o più livelli di diramazione e con i diramatori ottici disposti più o meno vicini alla OLT o alle sedi cliente, a seconda della disponibilità di fibra e delle strategie di introduzione della fibra ottica adottate dal gestore di rete; la fibra ottica impiegata è tipicamente di tipo single mode conforme allo standard ITU–T G.652.

La rete di distribuzione ottica rappresentata in figura è totalmente passiva, ma possono essere concepite soluzioni che fanno uso di elementi attivi all'interno della rete di distribuzione ottica (es. amplificatori ottici) al fine di consentire la copertura di maggiori distanze, l'utilizzo di un minor numero di tronconi con un numero più elevato di clienti (maggiore fattore di splitting, 2048 contro il 32–64 dello standard): in questo caso si parla di soluzioni "SuperPON". Tali soluzioni tuttavia sono, per il momento, in fase di sperimentazione nei principali laboratori di ricerca e sono state oggetto di studio in progetti di ricerca internazionali (ad esempio i progetti ACTS PLANET e PELICAN).

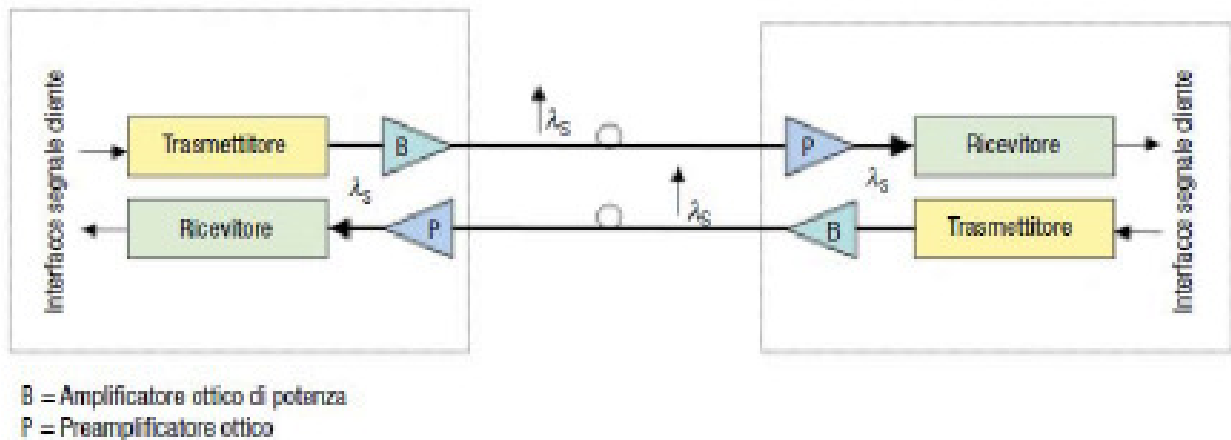
Come risulta evidente dall'esame della figura della struttura generale di una rete PON, il modello di rete presentato può essere applicato sia ad architetture di tipo FTTH (Fiber to the Home) – nelle quali la singola ONT è dedicata al singolo cliente – sia ad architetture con un maggior grado di condivisione della terminazione ottica (ONU) quali FTTB (Fiber to the

Building) o FTTC (Fiber to the Curb). È evidente che in questi due ultimi casi l'architettura di rete d'accesso potrà prevedere un parziale impiego di rete in rame, sfruttando così la capillarità di quest'ultima nel tratto terminale e riducendo notevolmente la necessità di posa di nuova fibra.

Per il drop su rame si possono utilizzare i sistemi trasmissivi ad alta velocità su rame della famiglia VDSL (Very High Speed Digital Subscriber Loop). Con queste soluzioni architetturali tuttavia si perde una delle proprietà essenziali delle soluzioni PON, cioè una rete puramente passiva tra apparato di rete e terminazione di utente. Tali differenti opzioni architetturali, oltre al diverso grado di condivisione degli apparati, presentano notevoli differenze in termini di requisiti funzionali e di implicazioni di esercizio; la soluzione FTTC, per esempio, richiede l'installazione in ambiente esterno (strada) della terminazione di rete ottica (ONU): questo richiede la realizzazione di un adeguato armadio (cabinet) in grado di soddisfare tutti i necessari requisiti di sicurezza, dissipazione termica e di alimentazione in grado di offrire la continuità dei servizi adeguata alle aspettative della clientela.

Tecniche di accesso al mezzo condiviso:

I sistemi ottici di trasmissione comprendono gli apparati necessari per trasmettere sulle fibre ottiche i segnali clienti. Essi possono essere suddivisi in due grandi categorie: i sistemi a canale singolo e quelli multicanale.



➔ I sistemi mono canale:

I sistemi a canale singolo, sono chiamati anche TDM (Time Division Multiplexing) in quanto i segnali trasmessi sono multiplati a divisione di tempo; essi trasmettono un solo canale ottico su una coppia di fibre, che è necessaria perché i segnali cliente sono bidirezionali.

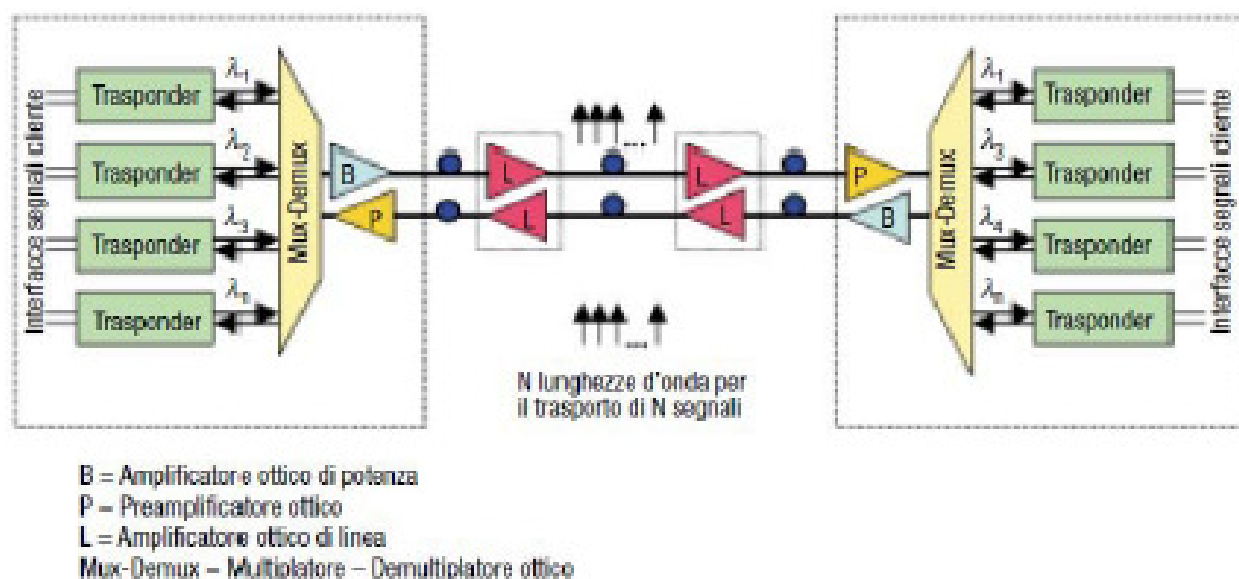
I sistemi ottici a canale singolo sono costituiti, in linea di principio, da un terminale trasmittente (dove si effettua, in particolare, la conversione elettro-ottica del segnale da trasmettere), da un terminale ricevente (dove si effettua, tra l'altro, la conversione ottico-elettrica del segnale ricevuto) e da un numero di amplificatori ottici che è funzione della lunghezza del collegamento da realizzare come si può vedere nella figura sopra.

In pratica, l'impiego dei sistemi TDM è limitato a collegamenti sufficientemente corti da non richiedere amplificatori intermedi. Il costo dell'inserzione in linea di amplificatori intermedi giustifica in genere l'installazione di un sistema WDM atto ad utilizzare gli amplificatori di linea con più canali.

Il campo di impiego dei sistemi ottici TDM va quindi dai raccordi all'interno delle centrali ai collegamenti periferici nelle reti metropolitane. Le Raccomandazioni ITU-T prevedono lunghezze fino a 160 km per sistemi con capacità fino a 2,5Gbit/s e lunghezze fino a 120 km per sistemi con capacità fino 10Gbit/s. La tecnologia ottica attuale consente tuttavia di realizzare anche sistemi TDM senza amplificazione intermedia dell'ordine di 250–300 km per applicazioni particolari, come, per esempio, i collegamenti sottomarini.

→ I sistemi multicanale:

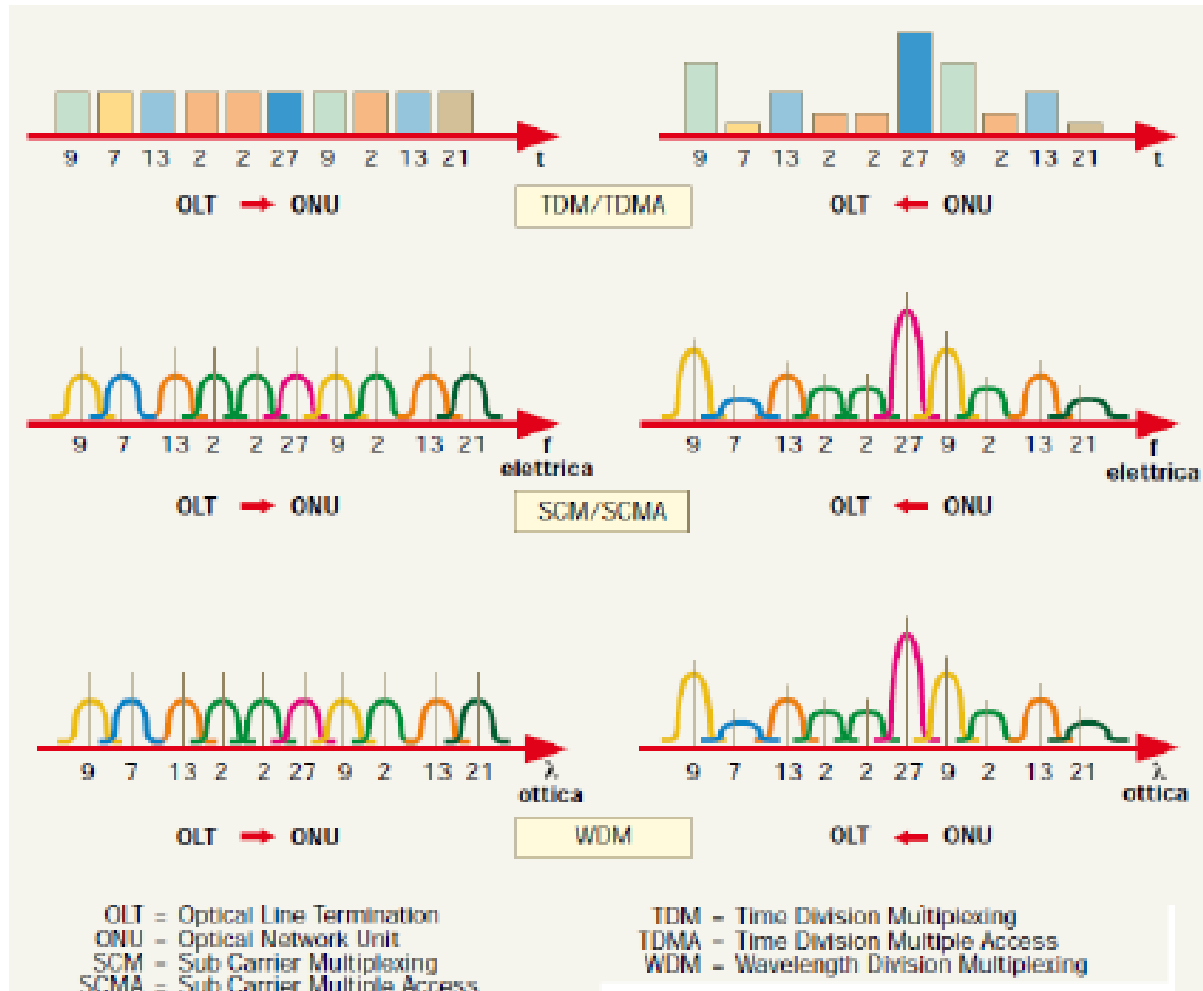
I sistemi multi-canale, indicati generalmente come WDM (Wavelength Division Multiplexing), trasmettono invece molti canali a diversa lunghezza d'onda su una coppia di fibre ottiche. In questi sistemi i terminali trasmettenti, le cui uscite sono evidentemente a lunghezze d'onda differenti, sono seguiti da un moltiplicatore ottico che ha il compito di affiancare tutti i canali da trasmettere sulla stessa fibra.



Un demoltiplicatore ottico con funzioni complementari a quelle del moltiplicatore riporta in ricezione tutti i canali alla stessa lunghezza d'onda. La lunghezza tipica delle sezioni di amplificazione è di 80 km. La rigenerazione elettrica fatta nel terminale ricevente annulla gli effetti di tutte le degradazioni (legate alle fibre e agli apparati) introdotte lungo il collegamento.

A seconda delle applicazioni, la spaziatura tra i canali in termini di lunghezza d'onda (o, equivalentemente, di frequenza) è diversa. Da questo punto di vista i sistemi WDM si dividono in due grandi categorie: i sistemi DWDM (Dense WDM) con spaziature tra i canali dell'ordine dei 100GHz in frequenza (circa 0,8nm in lunghezza d'onda) e i sistemi CWDM (Coarse WDM) con spaziatura tra i canali di 20nm in lunghezza d'onda (circa 1600GHz in frequenza).

Sono possibili diverse tecniche di accesso al mezzo condiviso: le tecniche di multiplazione più comunemente studiate e proposte sono la TDM/TDMA (Time Division Multiplexing/Time Division Multiple Access), la SCM/SCMA (Sub Carrier Multiplexing/ Sub Carrier Multiple Access) e la WDM (Wavelength Division Multiplexing) e, ma solo per citarla, la tecnica a divisione di codice.



Di seguito sono descritte le tecniche di accesso:

- **TDM/TDMA:** le informazioni destinate o provenienti dalle diverse ONU sono inserite in intervalli temporali (time slot) differenti della trama TDM/TDMA. Tali intervalli temporali possono essere di larghezza fissa o variabile. L'unità temporale utilizzata è un multiplo intero di byte (pacchetto).
- **SCM/SCMA:** le informazioni destinate alle diverse ONU modulano altrettanti sottoportanti elettriche per formare un multiplex in frequenza. Il segnale così generato è utilizzato per modulare in ampiezza l'emissione del laser. Le singole ONU trasmettono le informazioni d'utente ad esse assegnate. Un segnale multiplex in frequenza elettrica analogo a quello trasmesso dalla centrale all'utente, si rende così disponibile al ricevitore della OLT. I segnali provenienti dalle differenti ONU vengono estratti dal multiplex mediante filtraggio e poi demodulati.

- WDM: con questa tecnica, ciascuna ONU riceve e trasmette su una differente lunghezza d'onda ottica, ad essa riservata. Rispetto alla tecnica SCM/SCMA, in questo caso il filtraggio dei segnali avviene necessariamente a livello ottico, ma non è richiesta alcuna modulazione e demodulazione elettrica.

La tecnica TDM/TDMA è particolarmente adatta alla trasmissione di servizi numerici ed è quella più comunemente adottata. Essa consente di ottenere una notevole flessibilità nell'allocazione della banda, variando il numero medio di intervalli temporali (pacchetti) allocati nell'unità di tempo a ciascuna ONU. Per contro, tale allocazione è controllata da un complesso protocollo di accesso al mezzo condiviso MAC (Media Access Control). Inoltre il segnale multiplex numerico richiede una elevata velocità di trasmissione e sono necessarie opportune procedure di allineamento e calcolo del tempo di ritardo (ranging) per compensare le differenti distanze delle ONU dalla OLT.

La tecnica SCM/SCMA è stata studiata nelle fasi iniziali dello sviluppo delle soluzioni PON, nell'ottica di fornire servizi video diffusivi analogici in aggiunta ai servizi numerici. In tal caso, un segnale multiplex dei canali video compatibile con i ricevitori standard (apparati TV) può essere direttamente trasmesso sulla PON. La necessità di utilizzare laser ad elevata linearità (nella OLT) per ridurre gli effetti di intermodulazione e l'elevato numero di modulatori, demodulatori e filtri limitano l'impiego di tale tecnica.

La tecnica WDM riunisce in sé le caratteristiche positive delle due tecniche considerate in precedenza. Essa rende disponibile un differente canale ottico per ogni utente, con una banda pressoché illimitata e con la massima flessibilità d'uso. L'accesso a livello ottico consente anche di ottenere una elevata riservatezza delle informazioni. Peraltro, la tecnica WDM richiede l'uso di tecnologie ottiche ancora molto costose.

Quindi emergono in sintesi i seguenti punti di interesse relativi all'impiego e alle prospettive di questa tecnologia:

- le soluzioni PON offrono l'opportunità di conseguire significativi vantaggi economici per l'elevato grado di condivisione delle infrastrutture (fibra e apparati) e per la possibilità di escludere elementi attivi nel segmento di rete di distribuzione ottica;
- nelle configurazioni miste fibra e rame, utilizzando la ONU come elemento di snodo tra i due portanti, è possibile ridurre drasticamente la lunghezza del tratto in rame, elevando di conseguenza la capacità trasmissiva verso l'utente.

Questo approccio può rivelarsi molto interessante nei casi in cui l'attuale rete di distribuzione in rame è troppo lunga per supportare le velocità adeguate per fornire servizio larga banda; la definizione degli standard è praticamente conclusa per alcune soluzioni (BPON, Raccomandazioni ITU-T della serie G.983), mentre per altre soluzioni le attività di standardizzazione sono in fase conclusiva.

Optical Packet Metro:

La necessità di infrastrutture più scalabili ed efficienti, adatte a supportare al meglio e in tempi rapidi la transizione verso il broadband fisso e mobile secondo la strategia di convergenza recentemente intrapresa da Telecom Italia, ha portato alla nascita del Progetto Optical Packet Metro (OPM).

Si tratta della prima infrastruttura “di livello metro-regional” del gruppo che sarà in grado di trasportare in modo unificato tutti i servizi di accesso, di scalare in capacità di banda e di offrire differenti qualità di servizio.

OPM servirà ambiti a livello metropolitano e regionale a partire dalle principali aree metropolitane nazionali, estendendosi quindi verso una copertura nazionale.

La nuova rete metro-regional di Telecom Italia è un’infrastruttura “convergente” multi-servizio che utilizza tecnologie Ethernet allo stato dell’arte, in grado di supportare i servizi di nuova generazione per i clienti residenziali, per i clienti Business, nonché servizi infrastrutturali (backhauling), quali quelli per UMTS e le sue imminenti evoluzioni “High Speed”.

Con OPM il principio del “delaying”, ovvero la riduzione al minimo del numero di livelli utilizzati in rete per il trasporto e la gestione dei servizi end-to-end, viene esteso dall’OPB (Optical Packet Backbone) al trasporto metro-regional, con le collegate semplificazioni gestionali ed efficienze. Ad esempio i layer SDH ed ATM dell’accesso xDSL verranno gradualmente superati a favore di Ethernet e Wavelength Division Multiplexing (WDM).

L’unificazione della infrastruttura di accesso potrà portare, nel medio/lungo termine, alla concentrazione di tutti gli sviluppi funzionali su OPM, superando progressivamente le altre infrastrutture attualmente utilizzate, eventualmente anche ribaltando su OPM i servizi residui forniti da altre reti, con attese efficienze di investimenti e di costi di gestione.

Il pieno ed efficiente sfruttamento di OPM potrà esservi con la progressiva riduzione delle esigenze di banda nativa a circuito: attualmente si stima che questo “punto di arrivo” si collochi attorno al 20% della banda complessiva in rete.

In futuro OPM potrà abilitare sia i servizi broadband a larghissima banda, quali le evoluzioni High Definition IPTV (HD-IPTV) con accessi fino a decine di Mbit/s per cliente, sia lo sviluppo del Mobile Broadband, costituendo l’elemento fondante di accesso della Next Generation Network di Telecom Italia.

L’attuale architettura di rete metro-regional per l’offerta di servizi broadband è basata sul trasporto regionale SDH/PDH e su una rete di raccolta in tecnologia ATM (Asynchronous Transfer Mode), strutturata su due livelli:

- livello di accesso, costituito da DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) e concentratori ATM;
- livello di aggregazione, costituito da permutatori ATM.

La componente di trasporto della rete metro–regional supporta non solo l’offerta dei servizi di accesso alle reti dati ma anche i tradizionali servizi TDM:

- leased lines (CDA/CDF, CDN e circuiti parziali) per esigenze di clientela retail e per gli OLO (Other Licensed Operator);
 - circuiti per la rete commutata (circuiti a 2 Mbit/s tra Stadio di Linea e Stadio di Gruppo Urbano, accessi a 2 e 155 Mbit/s per interconnessione fonia, accessi ISDN PRA).
- L’OPM è, come OPB (Optical Packet Backbone), una rete multi–servizio per la convergenza dei servizi, innovativi e legacy, fissi, nomadici e mobili, sia per clienti finali sia per esigenze infrastrutturali.

I principali requisiti infrastrutturali possono essere riassunti nelle seguenti categorie:

- QoS: in termini di controllo dei ritardi end–to–end, di jitter, di tecniche di policing e di shaping del traffico, di congestion control per poter supportare al meglio la più ampia gamma di servizi possibile;
- Scalabilità: in termini di capacità dei link, di throughput e di MAC address gestibili dai nodi di aggregazione, di VLAN configurabili;
- Affidabilità: nodi di aggregazione carrier–class (completa ridondanza, architettura hardware modulare), meccanismi robusti e veloci di fault protection;
- Disponibilità: high availability(disponibilità) dei nodi di aggregazione (in–service software upgrade, no–stop forwarding(inoltro), stateful switch–over);
- Flessibilità: in termini di servizi e di protocolli supportati;
- OA&M: sulla componente di trasporto e soprattutto sui nodi di aggregazione.

La una nuova rete è costituita essenzialmente da apparati multilayer switch in grado di trattare grandi quantità di traffico sia a livello Ethernet che IP sia di mappare su Ethernet altre tipologie di traffico quali ATM, Frame Relay, ed in prospettiva traffico PDH e SDH garantendo tutti i requisiti di servizio richiesti.

La nuova rete è realizzata attraverso un “core” puramente Ethernet e IP e funzionalità “di bordo” dislocate negli apparati posti in sede Metro e nei Gateway di Accesso (GTWA) in grado di mappare su Ethernet, attraverso MPLS, altre tipologie di traffico quali ATM, TDM e Mobile.

Gli apparati della rete OPM sono distribuiti su 3 livelli principali: Metro, Feeder e Gateway di Accesso (GTWA).

Il primo livello di apparati Multilayer switch della rete OPM è costituito dagli apparati Metro posizionati nei PoP del BackBone IP/MPLS di Telecom Italia (OPB) e svolgono principalmente la funzione di aggregazione del traffico raccolto dal livello sottostante e di interfacciamento della rete OPM verso i suddetti nodi di servizio. Le interfacce tra i nodi Metro ed i nodi di servizio sono principalmente di tipo GbE ad 1Gbit/s.

I nodi Metro sono inoltre connessi ai router di bordo del Backbone OPB per permettere, tra l'altro e come descritto nel seguito, la distribuzione di canali televisivi su IP multi cast dall'unico centro di servizio (Head End) ai DSLAM GbE distribuiti su tutto il territorio nazionale. Le interfacce tra i nodi Metro e i router del PoP OPB sono tipicamente GbE ad 1Gbit/s.

Gli apparati denominati Feeder possono essere collocati nei PoP OPB o posizionati in "nodi cerniera" della rete trasmissiva ed hanno principalmente la funzione di aggregazione del traffico proveniente dai livelli più periferici. Le interfacce tra nodi Feeder e nodi Metro sono principalmente di tipo GbE a 10Gbit/s.

La magliatura tra i nodi Feeder ed i nodi Metro è dimensionata per il supporto dei servizi previsti per l'utenza business, residenziale e mobile.

Nel caso di apparati Feeder non collocati con apparati Metro, il collegamento viene realizzato su anelli WDM (sia Coarse sia Dense).

Un terzo livello di aggregazione è costituito dagli apparati Gateway di Accesso (GTWA) collegati ai Feeder con n collegamenti GbE a 1Gbit/s in single o eventualmente in dual homing (su due Feeder). Questi apparati sono installati generalmente nelle principali centrali di un'area regionale (in generale sedi SGU) ed hanno la funzione di estendere i punti di accesso della OPM per servizi business Ethernet e IP e di offrire l'accesso a servizi ATM, TDM (Circuit Emulation) e di rete Mobile (sfruttando funzionalità di mapping su Ethernet attraverso MPLS).

La nuova rete OPM che Telecom Italia sta realizzando in ambito metro-regionale, basata sui protocolli Ethernet e IP, ha quindi le seguenti caratteristiche e prospettive d'impiego:

- OPM è una rete basata su tecnologia Gigabit Ethernet e WDM che permette il trasporto di nuovi servizi Triple Play ad elevate esigenze di banda (high Speed Internet e IPTV) sempre più basati su IP.
- OPM abilita l'accelerazione dell'integrazione fisso-mobile su cui il Gruppo Telecom Italia si sta orientando, costituendo una unica infrastruttura di rete a pacchetto condivisa tra servizi di rete fissa e mobile per servizi disponibili su diversi tipi di terminali.
- Grazie all'utilizzo del mappaggio su Ethernet di servizi ATM e TDM (attraverso l'uso di MPLS), l'attuale rete OPM potrà anticipare l'unificazione del trasporto su un'unica infrastruttura di rete a pacchetto Ethernet/IP anche se molti servizi non sono ancora completamente basati sul protocollo IP. In prospettiva la migrazione in atto dei servizi verso il paradigma IP renderà ancora più conveniente l'utilizzo della infrastruttura attualmente in corso di realizzazione.
- Il principio del layering, cioè la riduzione al minimo numero di livelli di rete utilizzati per il trasporto e la gestione dei servizi end to end, già applicato al backbone IP OPB, con OPM viene esteso al segmento metro/regionale, permettendo di cogliere i relativi vantaggi in termini di riduzione costi e semplificazioni gestionali.
- In prospettiva OPM dovrà disporre di meccanismi di recupero dei guasti stabili e veloci e politiche di QoS sempre più sofisticate e flessibili, garantendo servizi di connettività anche per una clientela esigente quale quella business.

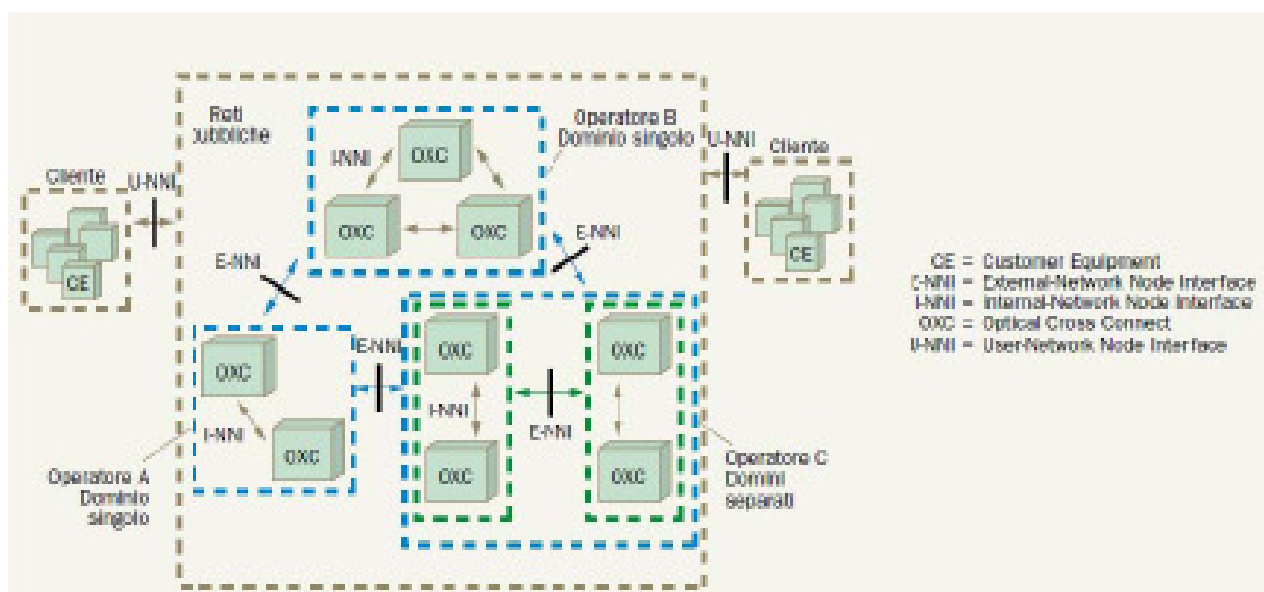
Sistemi ottici automatizzati:

Un notevole arricchimento dell'OTN è dato dalla ASON(Automatic Switched Optical Network). L'evoluzione da una OTN puramente trasmissiva ad una OTN intelligente (ASON nella terminologia ITU-T), mediante l'introduzione di un Piano di Controllo, basato sui protocolli di routing e di segnalazione della suite GPLS(Generalised MultiProtocol Label Switching) è il passo avanti verso la AON.

A questo scopo ogni ONE dovrebbe essere dotato di un OCC(Optical Connection Control) in grado di interconnettersi con gli altri OCC e con il sistema di gestione centralizzato e di impartire comandi a uno o più ONE. Si vogliono così rendere più semplici, più diretti e più rapidi i processi di attivazione, di cessazione, di modifica di instradamento di ciascun canale ottico, facendo svolgere le operazioni direttamente dagli organi di controllo presenti negli ONE dove sono raccolte e continuamente aggiornate tutte le informazioni necessarie.

I tempi per l'esecuzione delle operazioni di configurazione si riducono a qualche decina di millisecondi o a qualche secondo a fronte di qualche decina di minuti necessari con il sistema centralizzato. Inoltre l'ASON consente non solo di migliorare la qualità dei servizi di trasporto offerti (in termini di tempi di attivazione e di re instradamento in caso di guasti), ma anche di offrire nuovi servizi come la Bandwith on Demand e la Optical Virtual PrivateNetwork. Un'architettura ASON con intelligenza distribuita presenta numerosi vantaggi rispetto ad un'architettura tradizionale con un'intelligenza concentrata nel sistema di gestione. Anche per questa transizione non ci sono state voci dissenzianti: i vantaggi sono tali che tutti gli esperti dicono che si dovrà fare, anche se con le dovute cautele, come sempre accade per tecnologie nuove.

Gli standard per la ASON sono stati ormai praticamente completati in ITU-T (vedi figura) e diversi Operatori hanno già iniziato le prime sperimentazioni in campo, anche Telecom Italia ha presentato a Cannes un articolo con la descrizione della prima sezione di rete ASON (costituita da 27 nodi distribuiti sul territorio nazionale) che è appena entrata in servizio.



Si è voluto mettere in evidenza le caratteristiche dei nodi ODXC(Optical Digital Cross Connect) impiegati, lo schema di realizzazione del Piano di Controllo e di criteri per le future evoluzioni. Al riguardo sono state evidenziate le problematiche relative alla gestibilità da parte del Piano di Controllo di apparati di fornitori differenti.

Allo stato attuale è necessaria, infatti, la realizzazione di Piani di Controllo specifici per gli apparati di rete di ogni venditore, mentre l'interlavoro tra i diversi Piani di controllo resta ancora un problema da risolvere.

In particolare è stato mostrato che una struttura di rete OTN a maglia con nodi ODXC è quella che consente di offrire ai clienti la disponibilità di servizio più elevata (fino a 99,9998%) e che una struttura di rete ASON consente di tenere in considerazione anche le esigenze dei clienti che non desiderano valori di disponibilità così elevati e non sono quindi disposti a pagare canoni di affitto altrettanto elevati.

Per giungere a questa conclusione hanno confrontato le prestazioni di diverse architetture di reti ad anello e a maglia (con diversi gradi di magliatura), SDH e OTN, realizzate con diverse tipologie di apparati (DXC, ODXC), calcolando per ciascuna architettura il costo e la disponibilità ottenibile per i canali ottici dei clienti.

Verso una rete tutta ottica:

La Rete Tutta Ottica costituisce per i gestori l'obiettivo finale dell'evoluzione della rete di trasporto, poichè essa consente di eliminare quasi completamente i rigeneratori elettrici posti all'interno della rete di trasporto e permette di avere una completa trasparenza ai servizi.

L'evoluzione della OTN verso la AON dovrebbe avvenire con una graduale estensione della superficie delle isole ottiche fino al costituirsi di un'unica isola ottica nella quale il segnale cliente subisce una conversione elettro – ottica nel punto di origine (sede A del cliente) e una conversione ottico/elettrica nel punto di destinazione (sede B del cliente).

Questa evoluzione sarà possibile a mano a mano che saranno disponibili gli elementi di rete che operano al livello ottico finora mancanti (PXC, convertitori di lunghezza d'onda, rigeneratori ottici ecc.) e che, al contempo, saranno ottimizzate le modalità di compensazione delle degradazioni che si accumulano al livello ottico (equalizzazione, regolazione ecc.).

In realtà la realizzazione di una AON non è solamente legata alla disponibilità di apparati e di componenti più evoluti, ma anche ad altri vincoli posti dalla operatività e dalla gestione della rete di trasporto.

Allo stato attuale una rigenerazione al livello elettrico sembra essere sempre necessaria nel punto di interfaccia tra la rete del cliente e la rete dell'operatore allo scopo di mantenere ben distinte e separate le responsabilità a fronte del rispetto del SLA (Service Level Agreement).

Uno o due punti di rigenerazione dovrebbero rimanere ancora presenti tra i diversi livelli di rete (accesso, rete metropolitana, connessioni dorsali) per effettuare operazioni di raggruppamento (grooming) dei segnali cliente di piccola media / capacità in flussi di capacità superiore, per avere un'elevata percentuale di utilizzazione dei sistemi di trasmissione.

Un altro punto critico di una rete tutta ottica riguarda la difficoltà di mantenere sotto controllo la qualità dei canali ottici. La misura diretta delle prestazioni di errore, i cui obiettivi sono definiti nei SLA, è infatti possibile solo al livello elettrico. Le misure effettuate al livello ottico (optical monitoring) come la potenza trasmessa e ricevuta dai singoli canali e dai segnali multiplati, il rapporto segnale / rumore ottico e la deviazione di frequenza dei canali, mentre consentono di effettuare una corretta gestione dei guasti, danno solo un'“indicazione” di come stanno andando le prestazioni di errore e non una misura delle prestazioni stesse.

Per rendersi conto della entità del problema basti pensare ad un canale ottico Venezia–Napoli nel quale si accumulerebbero le degradazioni di 800 km di cavo ottico, di sedici amplificatori ottici bidirezionali e di quattro permutatori ottici. Ove si registrasse all'interfaccia tra la rete e il cliente finale una degradazione, per esempio, del tasso di secondi con errore (senza un'interruzione del canale ottico), le “indicazioni” ottenute dai parametri ottici controllati sarebbero quasi sempre tardive (rispetto al momento nel quale il cliente avverte la degradazione) e spesso insufficienti a individuare con tempestività e precisione le cause e il punto del degrado.

Un miglioramento di questa situazione si verificherà con il diffondersi dei punti di misura dei parametri di qualità ottici in tutti i punti critici degli apparati e con l'acquisizione di una vasta messe di dati e di correlazioni. Tuttavia, allo stato attuale, una soluzione soddisfacente del problema non sembra vicina e quindi anche in una rete tutta ottica sarà necessario disporre di rigeneratori elettrici sui quali terminare provvisoriamente in più punti successivi il canale degradato, per localizzare il punto in cui si origina la degradazione del segnale.

A fronte delle criticità insite nelle nuove tecnologie, delle esigenze di raggruppamento di canali, delle carenze della supervisione al livello ottico, alcuni gestori cominciano a chiedersi se quello di una Rete Tutta Ottica sia veramente l'obiettivo da raggiungere o se invece sia solo un obiettivo a cui tendere.

A questa riconsiderazione degli obiettivi non è estranea la comparsa sul mercato di nuovi trasponder realizzati con tecnologia SFP (Small Form Factor Pluggable) che hanno già oggi dimensioni, consumi e costi inferiori a quelli tradizionali, e che lasciano intravedere la possibilità di essere realizzati in nuove versioni di costo ben inferiore.

L'impiego di questi trasponder potrebbe infatti ridurre di molto l'onere complessivo legato alla presenza di punti di conversione ottico–elettrico–ottico.

Nonostante tutti questi punti ancora allo studio, la transizione da una OTN ad una AON è di grande interesse per gli operatori perchè renderebbe possibile l'eliminazione di tutte, o quasi, le conversioni O/E/O all'interno della rete dorsale, conversioni che attualmente sono presenti in migliaia di unità e che rappresentano una quota consistente del costo della rete stessa. È quindi ben comprensibile che operatori e manifatturieri discutano dell'argomento anche se con l'obiettivo di vederlo diventare una realtà non prima di 3–4 anni circa.

TECNICHE WDM

Sistemi WDM:

Wavelength Division Multiplexing(WDM) è la base tecnologica delle reti ottiche. È una tecnica che usa una fibra ottica(o apparecchio ottico) per trasportare diversi canali ottici in modo separato ed indipendente. Il principio su cui si basa è identico a quello usato quando si imposta un ricevitore TV per ricevere uno dei canali a disposizione. Ogni canale è trasmesso ad una diversa radio frequenza e noi scegliamo ciascuno di questi canali usando un demodulatore costituito da un circuito risonante. Si capisce quindi che la lunghezza d'onda nel mondo ottico è lo strumento più adatto per avere un riferimento di frequenza e la WDM ottica possiamo quindi pensarla come una FDM radio.

Un'altro modo per capire il funzionamento di una WDM è quello di considerare che ogni canale consiste di una luce di diverso colore per ciascuna lunghezza d'onda. La WDM trasmette quindi un intero "arcobaleno di colori". C'è da tener presente però che attualmente le lunghezze d'onda coinvolte nelle comunicazioni ottiche non rientrano nel visibile.

→ Componenti di un sistema WDM:

Sorgenti di luce di un sistema WDM:

I laser usati per i sistemi WDM sono in genere quelli usati per le comunicazioni a lunga distanza ordinarie. Tuttavia, alcune caratteristiche sono molto più marcate per i WDM e una serie di requisiti importanti sembrerebbero apparenti. Analizziamo alcune di queste caratteristiche:

– Larghezza spettrale e larghezza di linea

In generale in un sistema WDM "dense" abbiamo bisogno di un laser con un'unica linea nel suo spettro. La larghezza di linea richiesta dipende quindi dal numero di canali necessari per tale sistema e dalla tolleranza dei componenti che costituiscono tale sistema(demultiplexer per esempio). In generale si sceglie quindi la larghezza di linea più stretta, la migliore, questo ovviamente con un giusto compromesso tra costi e benefici.

– Stabilità della Lunghezza d'Onda

Nel più dei sistemi a lunga distanza(a singolo canale) abbiamo bisogno di laser con una larghezza di linea molto stabile e stretta per minimizzare gli effetti della dispersione e del rumore. Tuttavia in un sistema WDM abbiamo bisogno di minimizzare la variazione di lunghezza d'onda lungo il tempo. Uno shift di uno o due nm vorrebbero dire ritardare il tutto di alcuni secondi, i quali causerebbero la di-sincronizzazione di tutto il sistema WDM.

Il problema chiave sappiamo quindi essere quello della variazione della lunghezza d'onda del laser lungo il tempo(possibilmente uno o due anni). Gli elevati livelli di energia racchiusi nella cavità dei laser causano la degradazione dei materiali di cui è costituito che a loro volta causano quindi lo shift(sbandamento) del valore nominale della lunghezza d'onda generata.

Alcuni tra i problemi più frequenti è quello dell'uso del fosforo nei laser, infatti la presenza del fosforo come componente della lega che costituisce il semiconduttore può essere un problema in quanto tende a reagire insieme agli atomi di ossigeno generando un composto isolante.

– **Laser accordabili(tunable)**

I laser accordabili possono essere molto importanti nelle reti ottiche future:

1. Nelle reti LAN e MAN "Broadcast and Select" la messa a punto veloce sia dei trasmettitori come dei ricevitori è molto importante per garantire la corretta performance del sistema.

2. Nelle reti ad indirizzamento di lunghezza d'onda (particolarmente reti WAN) il mittente dovrà prendere il canale(lunghezza d'onda) che userà prima che la connessione sia stabilita. In questo caso quindi più che la velocità, si ha bisogno di un'accuratezza migliore nel scegliere(accordare) o impostare la lunghezza d'onda da usare.

3. nelle ultime generazioni di sistemi WDM la messa a punto sia del trasmettitore che del ricevitore non è richiesta. Tuttavia, è molto difficile da costruire laser con lunghezza d'onda equivalente a quella richiesta. Quello che si usa fare quindi è prendere un lotto dei laser desiderati e scegliere tra quelli uno che possa operare nella lunghezza d'onda desiderata. La messa a punto low-cost può quindi aiutare a superare questi problemi e anche quelli del "drift" dei laser.

Ci sono vari approcci per costruire laser accordabili tra i quali possiamo distinguere due tipi di tecniche base:

1. Variare l'indice di rifrazione della cavità adiacente al reticolo dei laser DBR(Distributed Bragg Reflector Lasers).

2. Variare la lunghezza d'onda riflessa da un reticolo esterno in una cavità laser esterna. Quest'approccio di solito coinvolge dei movimenti meccanici del reticolo che sono quindi relativamente lenti.

– **Laser a Multi-lunghezza d'onda(multi-wavelength lasers)**

Un modo che permette la regolazione molto veloce è quella di costruire insieme un certo numero di laser a diverse lunghezze d'onda nello stesso substrato. La regolazione può essere ottenuta in modo facile selezionando il laser che dovrà essere usato per la trasmissione. Alternativamente, possono essere inviati simultaneamente segnali multipli.

La figura nella pagina precedente mostra la struttura di un array di laser multi-wavelength. Lo scopo è quello di produrre una sorgente WDM a basso costo per canali multipli a velocità sopra i 2.4Gbps. Molte delle apparecchiature utili a questo scopo non sono ancora presenti in commercio, infatti si hanno una serie di problemi tra i quali:

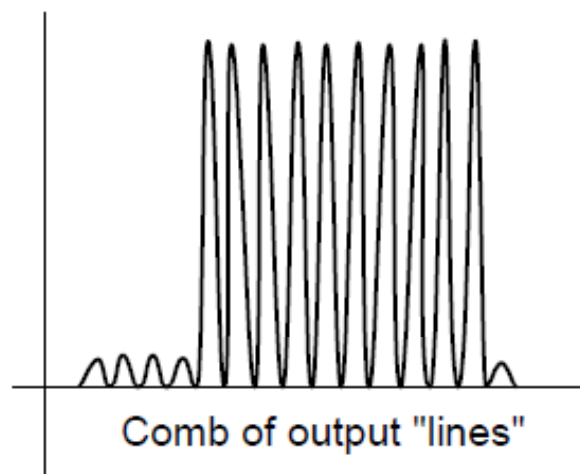
- E' molto difficoltoso costruire laser DBR che rispettino esattamente le lunghezze d'onda richieste. L'opzione usuale per affrontare questo problema, quella di accordare tramite il controllo di temperatura, è impossibile visto che l'array di laser comprende un certo numero di laser allocati tutti sullo stesso substrato.
- Quando la luce è mixata, una grande porzione di essa viene persa. Questo può essere potenzialmente superato usando una guida d'onda con struttura a reticolo.
- A causa della perdita di potenza causata dalla combinazione della luce abbiamo bisogno di amplificare l'intero fascio. Questo introduce i fenomeni di "crosstalk" e di saturazione.

– Laser Multilinea

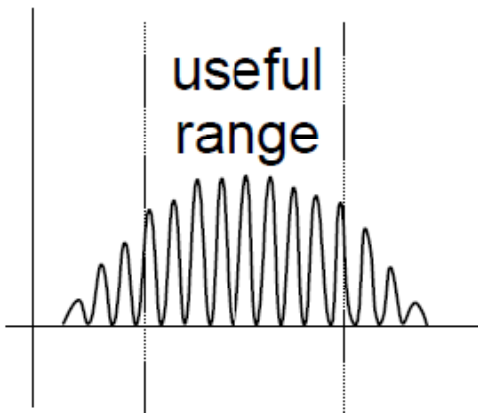
Un certo numero di approcci di sistemi WDM richiedono una sorgente di luce "multilinea". Il concetto qui è quello di produrre alcune lunghezze d'onda nello stesso apparecchio. Questo ha un certo numero di significanti vantaggi:

- Si può puntare sul costo della costruzione, visto che si hanno dei laser multipli assemblati assieme.
- Quando le lunghezze d'onda multiple sono generate da una singola sorgente, c'è una relazione fissa tra le lunghezze d'onda prodotte. Così se noi stabilizziamo il dispositivo con riferimento ad una lunghezza d'onda, stabilizziamo tale dispositivo per tutte le lunghezze d'onda. Lo svantaggio che si riscontra è quello del non poter modulare canali individuali (lunghezze d'onda) tramite il controllo della corrente che pilota il laser. C'è quindi il bisogno di una qualche forma esterna di modulazione per ciascun canale.

La figura mostra lo spettro di uscita che si vorrebbe ottenere. Questa figura è un po' diversa da quella reale in uscita dal laser. Ce da tener conto che nella maggior parte dei laser quello che si cerca di fare è ridurre il numero di "linee" ad una sola e di minimizzare la larghezza di essa. Qui noi vogliamo modificare il laser per produrre linee di eguale ampiezza con le spaziature desiderate tra i vari canali (linee).

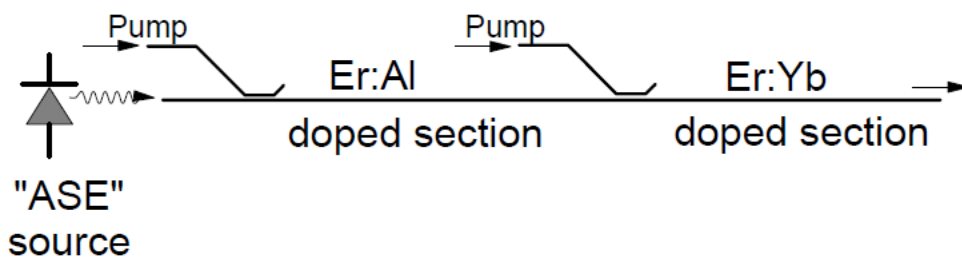


– Sorgenti ad emissione spontanea amplificata(ASE)



Il laser ordinario lavora sotto la soglia attorno alla lunghezza d'onda per cui è stato progettato e produce uno spettro multilinea molto vicino a quello che noi vogliamo ottenere. Possiamo infatti osservare questo fatto in figura. È chiamata sorgente "Amplified Spontaneous Emission" ossia "emissione spontanea amplificata". Ce da notare tra l'altro che la potenza totale è bassa e la maggior parte di essa è distribuita solo in alcune linee; causa per la quale le linee presentano diversa ampiezza(si veda la figura). Per essere utile ai nostri scopi, il segnale ha bisogno di essere allo stesso tempo amplificato e filtrato o compensato in un qualche modo che garantisca la uguaglianza delle ampiezze di tutte le linee del fascio.

Questo suggerisce l'idea di usare la non linearità nei EDFA per compensare la non linearità della sorgente ASE. Questo dispositivo è raffigurato nella figura di seguito.



La potenza presente nella facciata posteriore può essere controllata e usata per misurare la lunghezza d'onda di una delle linee. La stabilità della lunghezza d'onda può essere ottenuta dal controllo della temperatura del dispositivo così che una particolare linea di riferimento adatti il tutto ad una lunghezza d'onda predeterminata(Ovviamente, la relazione fissa tra le linee garantisce la stabilità delle altre linee tramite questo processo).

Il grande vantaggio di questo dispositivo è che ogni lunghezza d'onda è collegata esattamente ad ogni altra lunghezza d'onda. Se si determina una delle lunghezza d'onda, automaticamente si sono determinate tutte le altre. Si capisce quindi che non è possibile modulare una singola linea controllando la corrente di pilotaggio del laser! Per modulare indipendentemente ogni lunghezza d'onda, bisogna separarle e amplificarle indipendentemente. Non bisogna vedere tale limite come un difetto del dispositivo in quanto ogni sistema che usa questo tipo di dispositivo necessita in ogni caso della separazione delle linee. Ci sono vari modi per modulare lunghezze d'onda individuali con un fascio WDM senza demultiplexare(dividere) l'intero fascio.

Per esempio un modulatore acustico può fare questo(modulare indipendentemente singole lunghezze d'onda da un fascio WDM!). Recenti ricerche assicurano tra l'altro la possibilità di dividere singole lunghezze d'onda anche usando fibre ottiche, rendendo quindi utile l'implementazione di questo tipo di dispositivi nei sistemi attuali di modulazioni WDM.

Una caratteristica data dall'uso di una sorgente ASE è che le larghezze(in termini di banda) delle varie linee sono relativamente ampie e la lunghezza di coerenza molto bassa. Questo è un grande vantaggio per quanto riguarda la stima del rumore dovuto a riflessioni in sistemi a piccola distanza. Tuttavia in sistemi a lunga distanza la ampia larghezza(in termini di banda) delle linee crea problemi di dispersione.

Multiplexing(combinaire) la luce:

Da un punto di vista superficiale, mischiare(combinaire) un certo numero di sorgenti di luce diverse in un solo fascio può sembrare semplice. Nel mondo dell'elettronica noi possiamo unire alcuni diverse sorgenti in modo molto semplice e tra l'altro senza perdita di segnale. Sfortunatamente, in ottica questo non può essere possibile.

Gli accoppiatori passivi combinano la luce esattamente come vogliamo ma si verifica sempre una perdita di potenza quando si uniscono un certo numero di questi accoppiatori; infatti, se si combinano 8 segnali da fibre diverse in una singola fibra usando semplici accoppiatori, dopo, ogni singolo canale nell'uscita combinata presenterà un ottavo della potenza iniziale (perdita di circa 9dB). Se si combinano 64 segnali il segnale in uscita sarà un sessantaquattresimo dell'ampiezza originale(perdita di circa 18dB). Questa caratteristica non tiene conto su come questi accoppiatori sono costruiti(come un singolo accoppiatore di fibra fuso o accoppiatori concatenati a 3dB).

Tuttavia c'è un'altra via. Se usiamo il fatto che questi segnali sono tutti a lunghezze d'onda diverse, allora potremo usare i reticoli "Littrow gratings", array di reticoli AWG(array waveguide gratings) e dispositivi simili per integrare il segnale con una perdita molto più bassa. Un tipico "Littrow Grating" in commercio combina 32 canali con una perdita(per canale) di circa 6dB(3/4 del segnale viene perso). Gli AWG sono quotati con livelli di perdita in torno ai 5 dB per dispositivi in grado di trattare più di 64 canali! Anche se 5dB sembrano ancora tanti, i sistemi WDM pratici, per operare su distanze sopra il 70km o più, possono essere costruiti senza gli spazi appositi per gli amplificatori.

Anche se questi dispositivi sono costosi(confrontati con gli accoppiatori fusi) è possibile da implementare un sistema che usa un singolo reticolo sia per il multiplexing(combinaire) che per il demultiplexing(divisione) così da minimizzare l'impatto dei costi e renderlo minimo.

In sistemi con un numero ridotto di canali(4 per esempio) possono essere usati accoppiatori semplici. Se il numero di canali aumenta bisognerà quindi usare un reticolo o un amplificatore dopo il multiplexer.

Trasmissione

Nei sistemi WDM abbiamo gli stessi problemi che si presentano nel disegno di semplici link ottici. Tuttavia ce un altro numero di problemi che si presentano unicamente sui sistemi WDM(o almeno hanno un'importanza più marcata su questo tipo di sistemi).

– Controllo della Dispersione

In generale abbiamo gli stessi problemi di dispersione che si hanno con una singola lunghezza d'onda e le stesse tecniche di controllo della dispersione possono essere usate. Ma sono le lunghe tratte di collegamento che sono più soggette a fenomeni di dispersione e sono anche quelle che si vuole usare in genere per il WDM (come sistemi sottomarini per esempio) così noi guardiamo il controllo della dispersione come un elemento critico nel disegno dei vari sistemi. Nei WDM vogliamo usare laser con larghezza di spettro minima così da facilitare il posizionamento dei vari canali in modo accurato e garantire quindi la giusta separazione tra di loro. Questa è un'altra delle caratteristiche di cui abbiamo bisogno per rendere minima la dispersione. Un altro aspetto delle WDM è quello per cui nel sistema stesso ce una tecnica di controllo della dispersione. La dispersione diventa sempre più preponderante tanto più elevata è la velocità della luce iniettata nel canale. Con WDM si possono quindi usare un certo numero di fasci più lenti anziché uno solo molto più veloce, andando incontro quindi appunto ai fenomeni della dispersione che sono direttamente legati alla velocità della luce all'interno della fibra! In un sistema WDM a 4 canali a 2.4Gbps ciascuno per esempio abbiamo meno dispersione rispetto a quella di un singolo canale a 9.6Gbps.

– Effetti d'Interferenza

Una delle questioni nei WDM è quella della mutua interferenza tra i canali ottici insieme ai dispositivi lungo la linea e durante la trasmissione. I due più importanti effetti di trasmissione sono chiamati: “scattering simulato di Raman” e “4-wave mixing”. Altri effetti si verificano negli amplificatori ottici quando operano vicino alla saturazione.

– Selezionare le lunghezze d'onda

Un modo possibile per limitare il fenomeno di crosstalk tra i canali è quello di spaziare i canali WDM in modo non uniforme. In questo modo le spaziature tra i canali sono calcolate in base al rumore causato dal “4-wave mixing”. Questo è spesso suggerito ma tale tecnica è raramente usata nei sistemi in commercio.

Demultiplexing(scombinare) la luce:

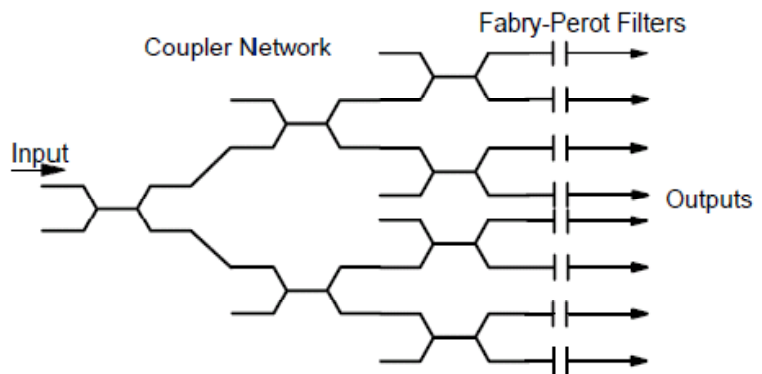
Esistono 3 modi generici per il demultiplexing:

1. Dividere la luce mixata(combinata) in alcune uscite mixate(una per porta di uscita) e poi filtrare ciascuna porta individualmente(Array di Splitter).
2. Dividere un singolo canale alla volta(Circolatori).
3. Demultiplexare l'intero fascio di canali ottici in un' unica operazione.

Sono di seguito citati degli esempi di ciascun modo.

– Array di splitter a 3dB con Fabry-Perot Filters

In questa configurazione gli splitter a 3dB in cascata sono usati per dividere il segnale complessivo nelle sue componenti equivalenti com'è necessario. La figura mostra quindi una configurazione a otto porte. È necessario quindi separare ogni singolo segnale dagli altri. In questo caso la separazione è ottenuta con filtri Fabry-Perot (dividono l'intero fascio in ingresso in due fasci risultanti tramite un beam splitter per poi ricombinarli su un altro beam splitter). Tra l'altro è possibile rimpiazzare i filtri FP usando fibre FBG (fiber bragg gratings) e circolatori (questo accrescerà la precisione della selezione della lunghezza d'onda ma anche il prezzo). In modo uguale gli splitter a 3dB possono essere rimpiazzati con un singolo accoppiatore di fused-fibre.



Questa configurazione è usata nei sistemi di ricerca ma ha una serie di svantaggi:

- La perdita di Potenza del sistema si accumula molto rapidamente. In figura, infatti, la perdita totale di potenza (se gli splitter sono perfetti) è di 9dB per porta prima di usare un 3dB per il FP addizionale. Un disegno di rete serio per ambiente WAN può probabilmente aver bisogno un preamplificatore ottico per aumentare il segnale prima della divisione (split).
- Se costruito con accoppiatori di fibre il tutto diventa disordinato e difficile da gestire. Tuttavia, se si costruisce una tecnologia planare (su uno stesso substrato) questo svantaggio è superato.
- Il costo tende a variare linearmente col numero di porte. Con un basso numero di porte, questo sistema è fortemente consigliato. Con un gran numero di porte gli approcci da adottare diventano quelli per cui si fa un confronto costo-efficienza.

– Circolatori con FBG

In questa configurazione ciascuna lunghezza d'onda è individualmente separata dal fascio multiplexato.

1. L'ingresso consiste di alcune lunghezze d'onda in arrivo (dalla sinistra della figura).
2. Tale fascio entra nel primo circolatore e la sua uscita nel primo FBG.

3. L'FBG riflette la lunghezza d'onda selezionata indietro al circolatore ma permette alle altre lunghezze d'onda di passare. Con alcuni tipi di circolatori questa operazione può provocare una perdita di potenza di 1dB o meno.

4. La lunghezza d'onda scelta percorre il circolatore alla porta tre, dove c'è l'uscita.

Tutte le altre lunghezze d'onda continuano attraverso l'FBG al prossimo circolatore dove il processo è ripetuto per la seconda volta. Lunghezze d'onda individuali sono demultipliate nello stesso modo di procedere, da uno stage ad un altro.

Ci sono vari aspetti da prendere in considerazione per questo dispositivo:

- si possono separare i circolatori e i FBG così da collegare ciascuno col suo dispositivo finale. La fibra viene poi connessa in una configurazione ad anello da dispositivo a dispositivo.

- ci possono essere canali stretti, molto selettivi e separati.

- dipendendo dalla qualità dei circolatori si possono avere perdite attorno agli 1.5dB per stage. Questo risultato si presenta piuttosto buono ma ancora richiede amplificazione se un grande quantità di canali sono coinvolti.

- il costo si presenta lineare col numero di porte così da renderla una tecnologia molto competitiva se il numero di canali è molto ridotto. Alcuni sistemi odierni(4-channel)WDM usano questo principio.

– Interruttori Ottici(Nodi)

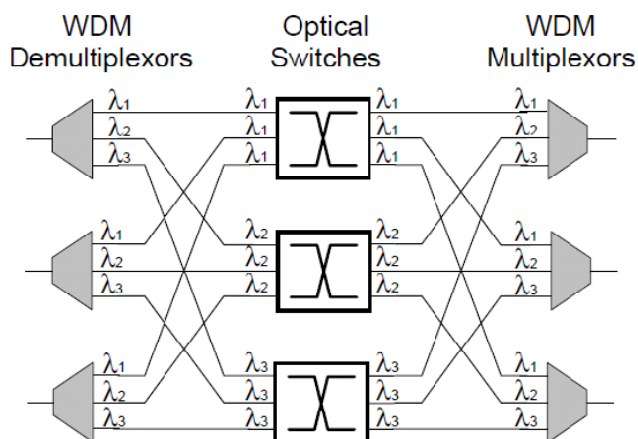
Gli switch ottici a divisione di spazio stabiliscono connessioni ottiche bidirezionali tra porte in ingresso e uscita. Tuttavia non è (lunghezza d'onda)-sensibile per cui scambia le lunghezze d'onda su una porta ad un'altra porta senza accorgersene di quale lunghezza d'onda sia in ballo. Infatti tali interruttori possono connettere flussi WDM consistenti da varie lunghezze d'onda da una porta ad un'altra.

→ Collegamenti incrociati(Crossconnects) e switch ottici

Nel contesto di commutazione di elementi, un collegamento incrociato è un elemento switch con due porte, una in ingresso e l'altra in uscita.

Nel contesto delle reti, una cross-connessione(crossconnect) è un nodo di commutazione il cui stato è cambiato e controllato dal sistema di gestione di tale rete. Questo vuole dire che il cambiamento di stato di tale nodo (crossconnect) è qualcosa che coinvolge tempi in una scala di secondi piuttosto che in una scala di microsecondi.

Per rendere utile la “crossconnessione” o nodo di commutazione vogliamo riuscire a commutare singole lunghezze d’onda. Questo vuole dire che prima che noi commutiamo un segnale, dobbiamo prima scomporre l’intero fascio WDM nelle sue varie componenti così che solo una lunghezza d’onda è presente ad ogni porta d’ingresso del nodo di commutazione. In uscita abbiamo quindi bisogno di re-multiplexare le singole lunghezze d’onda nelle sue rispettive fibre in uscita.



Uno schema di un nodo di commutazione usuale è rappresentato in figura.

Questo vuole dire che non possiamo commutare la stessa lunghezza d’onda da ingressi multipli sulla stessa porta di uscita? Per prima cosa non è un pensiero logico da fare in quanto i segnali una volta mixati diventerebbero spazzatura! Per seconda cosa, se noi provassimo a farlo dovrebbe esserci qualcosa negli switch(nei multiplexer WDM) per separare i vari fasci entranti, cosa non possibile. O per ultima cosa non si può pensare di avere una cosa del genere senza una attenuazione rilevante. Questo è il motivo per il quale gli switch in figura sono progettati per gestire una singola lunghezza d’onda.

A causa del fatto che non si possono avere le stesse lunghezze d’onda provenienti da diverse porte d’ingresso che vadano sulla stessa porta di uscita, questo tipo di switch è limitato nelle opzioni di connessione che esso può offrire. Per poter offrire un qualsiasi tipo di connessione tale nodo dovrebbe essere in grado di cambiare le lunghezze d’onda in gestione durante il processo di commutazione, deve essere in grado di gestire diverse lunghezze d’onda.

Naturalmente tutti questi switch sono controllati elettronicamente! se c'è una cross-connessione, il computer controlla l'elemento di commutazione da una console di gestione della rete. Questa è la terza parte dell'operazione di gestione. Se questa è considerata un vero e proprio switch a comunicazione reale, allora i dispositivi degli utenti finali richiederanno una connessione da stabilire attraverso un sistema conosciuto come sistema di segnalazione. Ci sarà quindi bisogno di avere qualche processo nel nodo di switch per avere l'effetto di una comunicazione bi-direzionale tra lo switch e i dispositivi degli utenti finali in modo da poter passare l'informazione necessaria per stabilire le connessioni.

Convertitori di lunghezza d'onda

Una vasta area di reti ottiche completamente funzionale può essere pensata come un set distribuito di nodi indirizzati(routing). L'apparecchiatura dell'utente finale può essere connessa ad alcuni oppure a tutti questi nodi. La interconnessione tra questi nodi può essere fatta attraverso fibre ottiche, ognuna delle quali può portare un certo numero(si pensi 64 o più)di canali ottici.

In reti molto ridotte del tipo sopra descritto possiamo allocare dinamicamente particolari lunghezze d'onda a connessioni individuali e forse dirigere il segnale con un collegamento "end-to-end" lungo la rete senza il bisogno di cambiare le lunghezze d'onda lungo il tragitto. Tuttavia quando tale rete è ingrandita in modo significativo, l'allocazione di un'unica lunghezza d'onda lungo il collegamento end-to-end diventa molto difficoltosa se non impossibile. La rete può avere alcuni canali ottici "vacanti" nel link ma una singola lunghezza d'onda può non essere disponibile lungo il collegamento tra i due utenti finali.

Per superare questo problema sarà quindi necessario cambiare la lunghezza d'onda di alcuni segnali man mano che attraversano la rete. La conversione di lunghezza d'onda è ancora una tecnica di laboratorio. La disponibilità commerciale dei dispositivi adatti è quindi assente. Tuttavia, nel futuro potrebbe diventare un principio molto interessante e utile per convertire le lunghezze d'onda.

Conversione Opto-Electronica

Il contesto dei metodi di conversione ottica pura discussi di sopra convertono il segnale in una determinata forma elettronica intermedia. Tuttavia, questa è forse la tecnica maggiormente usata nei sistemi WDM correnti per la connessione dei dispositivi di utente finale.

In realtà ci sono due ambienti abbastanza distinti qui:

1. In una rete WDM tutta ottica dove un canale(lunghezza d'onda) arriva ad un nodo intermedio, abbiamo bisogno di cambiare la lunghezza d'onda ad una diversa in modo da poter dirigere il segnale avanti fino al prossimo nodo ottico.

2. All'interfaccia di utente finale di una rete ottica o una delle tipiche reti WDM attuali. In questo caso l'attacco con l'utente finale è spesso nella banda dei 1310nm e possono venire usati LED in fibre MM! In questo ambiente la maggior parte delle tecniche di conversione non possono lavorare in ogni caso. Nella conversione "opto-elettronica" il segnale è ricevuto usando un diodo pin regolare o APD e poi convertito ad una forma elettronica. In pratica questo è usualmente "ripulito" qui, il che vuole dire che il segnale è convertito in un impulso digitale con una forma ben definita nei bordi. Tuttavia, per preservare il bit rate e la indipendenza di codifica digitale, il segnale è tipicamente non ri-campionato. Questa "pulitura" del segnale è usata per impostare il trasmettitore laser ad una specifica lunghezza d'onda.

Anche se antiestetico, questo è un pensiero molto usuale da fare. La "pulizia" del segnale attualmente rimuove il più(non tutti) degli effetti di dispersione! Quando l'impulso è pulito, dobbiamo scegliere un livello di segnale sul quale si può quindi stabilire la decisione tra "0" e "1" come valore del singolo bit. Questo processo taglia inevitabilmente una porzione della dispersione ricevuta presente nei bordi dell'impulso ottico.

Tuttavia, questo metodo non può rimuovere tutta la dispersione e quindi non è così efficiente come una rigenerazione completa del segnale.

Questi svantaggi dell'elettronica sono quelli che consumano una quantità rilevante di potenza, aggiungono anche un rumore significativo al segnale ed è difficile(inteso come costoso) da progettarli per alti valori di bit-rate a causa del problema dello scambio incrociato di potenza(crosstalking).

Negli esperimenti con la IBM 9729 fu scoperto che una buona comunicazione e di qualità è possibile ad una distanza di 350km(usando 9729(coppie di cavi twistati) intermedi per rigenerare il segnale).

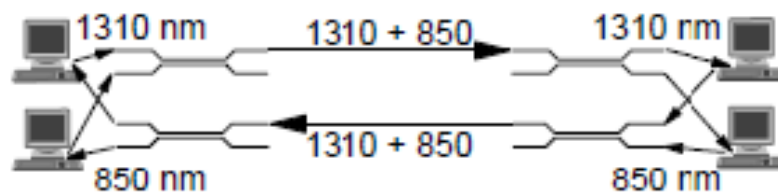
Come tecnologia per i nodi di commutazione intermedi, l'elettronica dovrebbe essere considerata come una tecnologia provvisoria, utile nel breve termine.

Come tecnologia per interfacciare una rete ottica all'apparecchiatura di un utente finale c'è un'alternativa non praticabile dell'elettronica dove:

1. la connessione dell'utente finale usa la banda 1310nm.
2. la connessione dell'utente finale è fatta in una fibra MM.
3. la qualità del laser di utente finale è problematicamente(bassa) o incontrollata.

SISTEMI "Sparse" WDM:

Ci sono diversi tipi di multiplazioni WDM. Un tipo semplice può essere costruito usando la 1310nm come una lunghezza d'onda e la 1550 come l'altra; oppure usare la 850 e la 1310nm. Questo tipo di WDM può essere costruito usando componenti relativamente semplici e poco costosi tenendo presente che alcune applicazioni di questo sistema possono operare diversi anni. Un esempio può essere quello della WDM "sparsa":



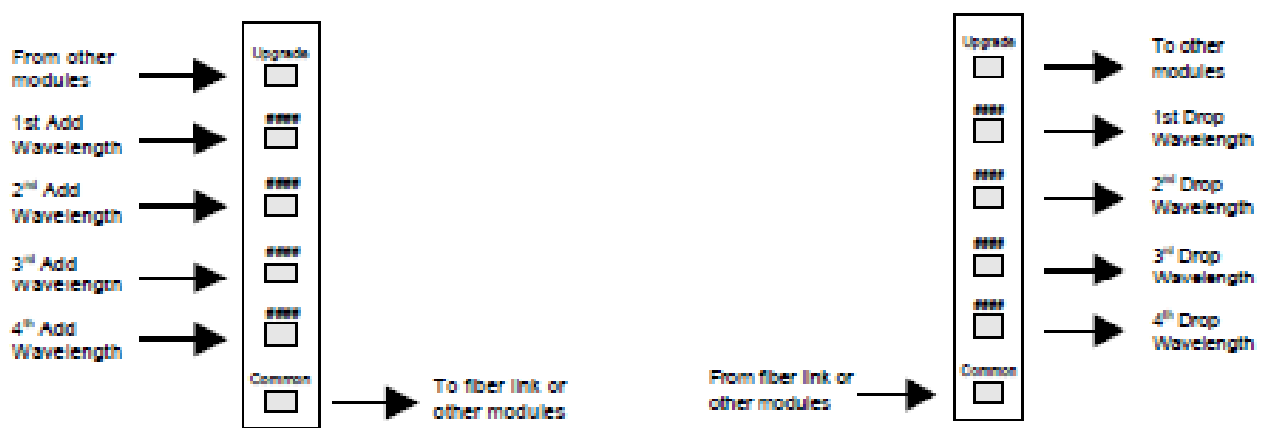
Il disegno in figura mostra un esempio di sistema WDM molto sparsa usando fibre multimodali. Gli accoppiatori di lunghezza d'onda selettivi sono usati per mettere insieme (multiplex) e per separare(demultiplex) i segnali. La caratteristica principale quindi di questo tipo di WDM è quella della separazione molto estesa delle lunghezze d'onda.

Ci sono diverse varianti per quanto riguarda questo tipo di sistema WDM. Alcuni sistemi usano una singola fibra bidirezionale mentre altri usano fibre separate per ogni direzione (come illustrato). Altri sistemi usano diverse bande di lunghezze d'onda come illustrato in figura(1310 e 1550 per esempio). I sistemi più comuni sfruttano velocità molto basse rispetto alle loro capacità teoriche(in base agli standard attuali). Le più comuni applicazioni si verificano nel trasporto di segnali video, monitoraggio di sicurezza e impianti di controllo dei processi.

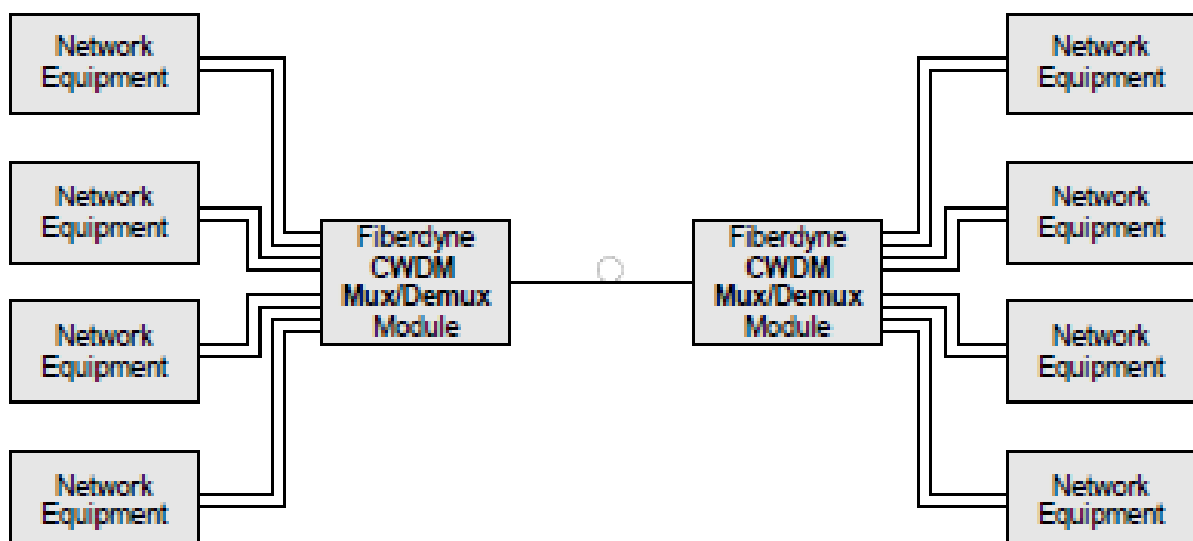
SISTEMI CWDM

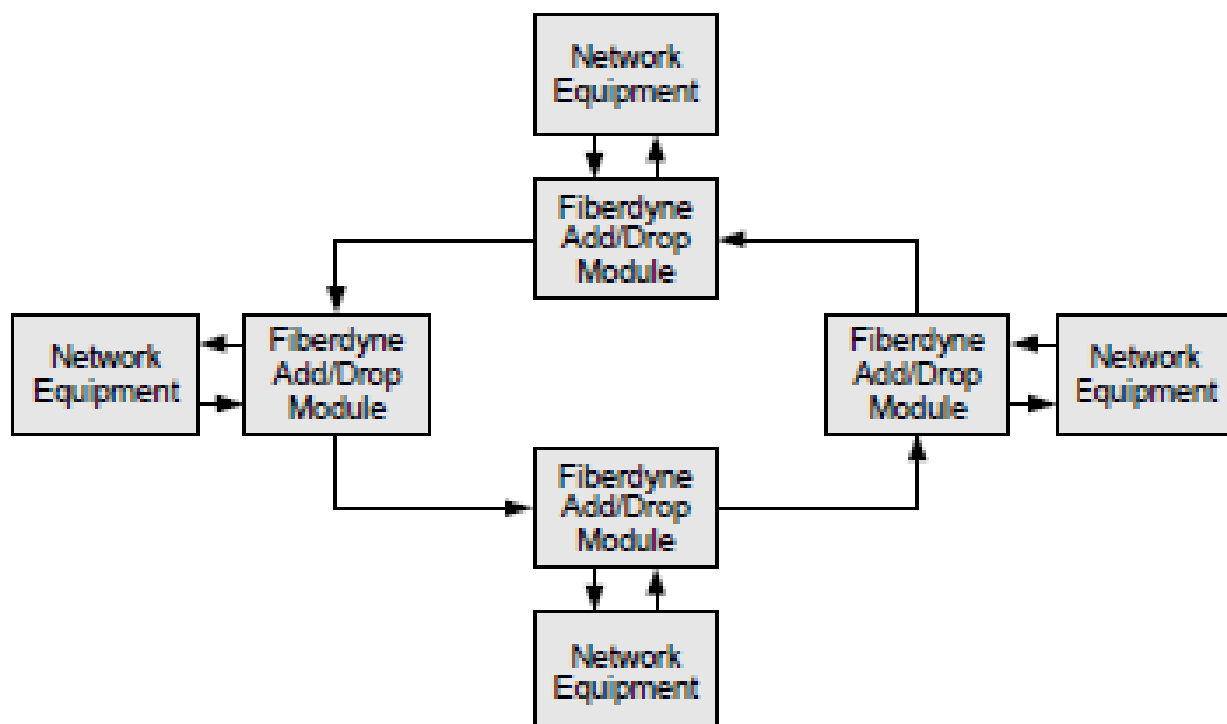
→ Definizione sistema CWDM

Per prima cosa filtrano la luce, assicurandosi che solo la lunghezza d'onda desiderata venga usata. Per seconda cosa, essi moltiplicano e demoltiplicano lunghezze d'onda multiple, usate su un singolo collegamento su fibra. La differenza risiede nelle lunghezze d'onda che vengono usate. Nello spazio CWDM, la banda 1310nm e la banda 1550nm sono divise in due bande strette, ciascuna larga solamente 20nm. Nell'operazione di moltiplicazione, le bande delle lunghezze d'onda multiple sono combinate in una singola fibra. Nell'operazione di demoltiplicazione, le bande delle lunghezze d'onda multiple sono separate da una singola fibra.

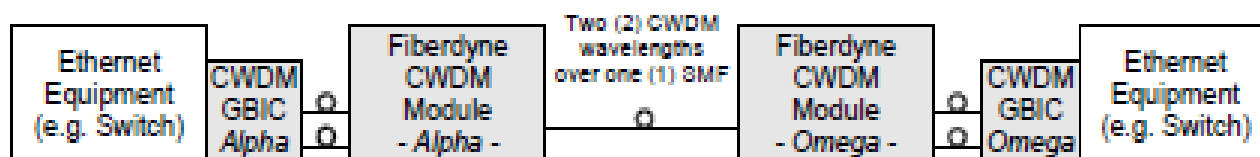


In genere, una rete CWDM prende due forme. Un sistema punto-punto connette due località, multipla e demultipla segnali su una singola fibra. Un ciclo o sistema multi-punto connette località multipli, tipicamente usando moduli Add/Drop. Si veda in figura:





Usando apparecchi Fiberdyne, si possono adottare due implementazioni. In una di queste (si veda la figura sotto), i convertitori GBIC (Gigabit Interface Converters) di Fiberdyne CWDM sono aggiunti all'apparecchiatura di commutazione Ethernet già esistente. L'uscita dei GBIC alimentano i moduli CWDM Fiberdyne. Nell'altra implementazione (guarda la seconda figura in basso) aggiunge il sistema multiplexer ottico Fiberdyne 3001 alle uscite del sistema di commutazione Ethernet già esistente.



→ Specifiche e applicazioni dei sistemi CWDM

Il sistema CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing), come una specie di sistema di trasmissione WDM a piccole distanze, è stato riconosciuto e praticato in applicazioni di reti MAN. I sistemi CWDM possono essere applicati a reti metropolitane o cittadine, e allo stesso tempo possono essere applicate a reti "City Core" che sono quelle su cui la sua implementazione è più pratica. Il sistema CWDM è una estensione della famiglia di reti metropolitane ottiche.

Operatori via cavo e altri service provider possono utilizzare la tecnica CWDM in ambienti esterni per aggregare, su una singola fibra, canali ottici CWDM multipli e privati generati da consumatori multipli locali. Gli operatori possono anche piazzare questo sistema nello scantinato di una costruzione multi-utente per servire quindi multi-utenti con servizi ottici completamente privati.

Un CWDM GP-4/8 può essere usato in un collegamento su fibra multiplato 4/8 in 1, rimpiazzando l'apparecchiatura installata sul cavo ottico a fibra, aumentando l'efficienza di larghezza di banda con basso costo. Questo fatto è applicato alle reti MAN (Metropolitan Area Network), in particolare gli inconvenienti nella mancanza delle risorse delle fibre e altri operatori hanno bisogno di accrescere l'efficienza della larghezza di banda. L'apparecchiatura è sfruttata quindi usando tecnologie CWDM, canali multiplati multi-ray i cui intervalli di lunghezze d'onda sono di 20nm in una o un paio di fibre per la trasmissione. Questo può essere implementato su qualche sistema punto-punto o sistema multipunto ottico. La sua tecnologia completa e il loro costo basso, possono ridurre il capitale investito nelle MAN ed estendere le loro capacità così da renderle competitive. L'apparecchiatura può essere implementata a servizi di trasmissione estera come le reti di accesso e di trasporto nelle SONET, Ethernet, ATM e le MAN.

SISTEMI DWDM

→ Definizione sistemi DWDM

Così come una trasmissione di dati diventa sempre più "pesante", così richiede anche delle fibre "forti" (capienti) su cui viaggiare. Nel mondo della tecnologia quindi il termine "capiente" diventa "denso". Piuttosto che costruire più fibre, i ricercatori preferiscono trovare il modo di trasmettere una maggiore quantità di dati sulle fibre già esistenti nelle reti attuali. Un modo per poter arrivare a questo risultato è quello di usare una modulazione DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Fondamentalmente, questa tecnica usa meno per ottenere di più! Pensiamo ad una banda di frequenze radio; varie stazioni possono trasmettere i loro segnali senza rendere impossibile il fatto di scegliere la radio stazione desiderata ad ogni utente.

I sistemi DWDM mettono insieme segnali multipli e inviano questi ultimi allo stesso tempo e sulla medesima fibra ottica, con trasmissioni diverse che prendono luogo a diverse lunghezze d'onda. I sistemi più moderni di questo tipo permettono di avere molto di più di una piccola quantità di linee di trasmissione.

Sistemi con più di 160 lunghezze d'onda non sono poco comuni. Esistono infatti fibre che grazie alla loro struttura e possibilità di dividere bene le varie lunghezze d'onda, sono capaci di trasmettere a velocità sopra i 400Gbps. Il DWDM è estremamente adattabile e versatile pure lui, in questo ambito tale sistema può variare il tipo di dati così come la lunghezza d'onda alla quale essi viaggiano.

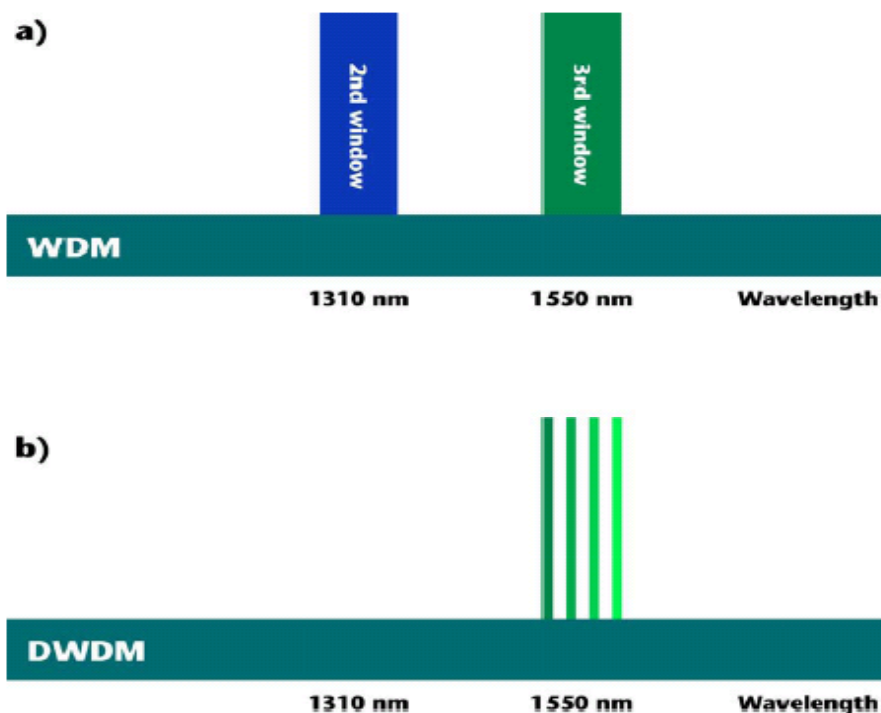
Le aziende di telecomunicazioni hanno cercato delle tecnologie adatte a rispondere alle sempre crescenti richieste dei consumatori in termini di tipo di dati trasmesso e quantità di dati trasmesso; includiamo qui il video streaming che richiede quindi grandi quantità di larghezza di banda per creare comunicazioni in tempo reale. Alcuni dei più importanti service provider hanno riportato la necessità di aumentare la banda al doppio della loro capacità in termini di tempo che vanno dai 6 ai 9 mesi. I sistemi DWDM permettono questo tipo di trasmissioni adottando la divisione virtuale delle capacità delle singole fibre ottiche in più di due portanti.

Pensiamo ai sistemi DWDM come dei sistemi "pipeline" che permettono la trasmissione e il transito di più tipi e variati dati, allo stesso tempo su una singola fibra ottica.

Non dobbiamo però dimenticarci del fatto che nel mondo reale un sistema a "pipeline" ritrova i suoi limiti nello spazio finito. Nel mondo delle fibre ottiche invece lo spazio finito non rappresenta un vero problema.

→ Specifiche e applicazioni dei sistemi DWDM

Il precursore del DWDM, Wavelegnth Division Multiplexing(WDM), permise la trasmissione di due segnali, uno nella seconda finestra ottica intorno ai 1310nm e l'altra nella terza finestra ottica intorno ai 1550nm. Il principio del WDM è rappresentato nella figura a). Due canali sono trasmessi nella stessa fibra, una in ciascuna finestra quindi raddoppiando la capacità della fibra stessa.



Dalla figura b) possiamo notare che la capacità della fibra è moltiplicata utilizzando il principio DWDM, dove diversi canali poco spazati sono trasmessi nella terza finestra ottica della fibra mono-modale (solo 4 canali sono raffigurati). Ogni canale è trasmesso ad un diverso "colore" di luce rispetto agli altri canali.

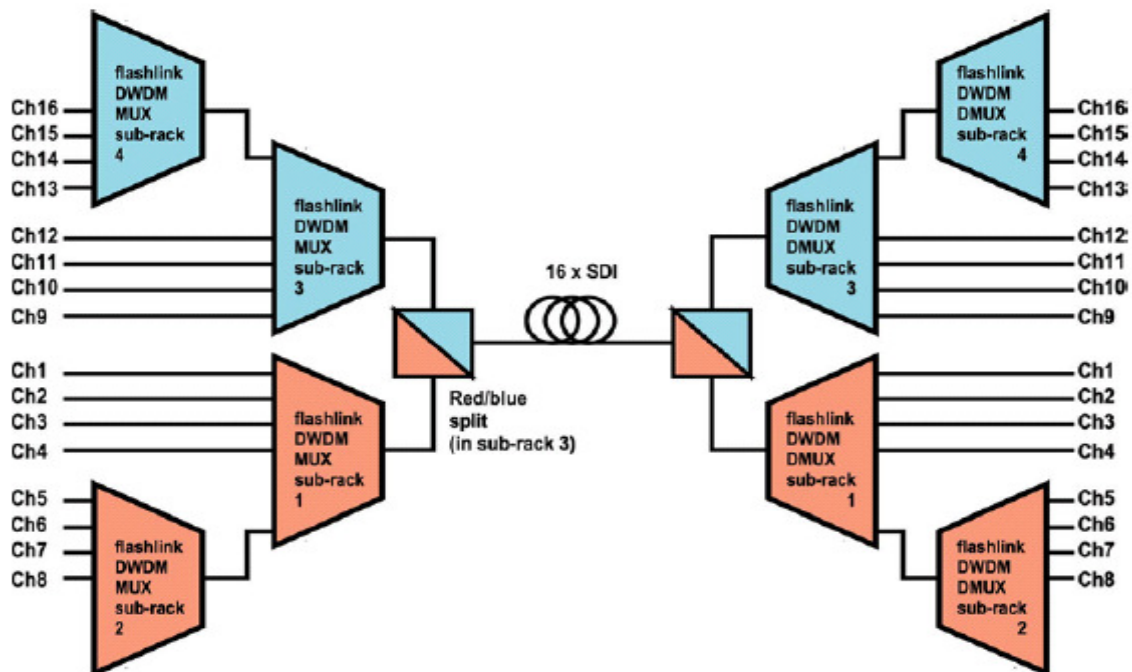
La lunghezza d'onda centrale di ogni canale oltre allo spazio assegnato tra i canali, sono specificati esattamente dalla ITU (International Communication Union) nella raccomandazione ITU-T G.692. L'apparecchiatura di comunicazione DWDM segue queste specifiche, per motivi di compatibilità così da permettere anche ai sistemi DWDM di entrare nel mercato dei sistemi di trasmissione broadcast.

Con una semplice apparizione dei sistemi WDM e DWDM in figura, notiamo che la stabilità delle lunghezze d'onda e la larghezza di linea dei laser possono avere caratteristiche diverse e fondamentali. I sistemi DWDM richiedono una precisione delle lunghezze d'onda molto migliore e capacità di filtraggio molto più accurate rispetto ai comuni sistemi WDM. Una tipica specifica della lunghezza d'onda centrale dello standard dei laser non-DWDM è $1550 \pm 20 \text{ nm}$. Confrontando questo con la spaziatura tra i canali in un sistema DWDM a 16 canali di 1.6 nm , la conclusione è che i laser non-DWDM non possono essere usati per applicazioni DWDM. In sistemi DWDM la stabilità delle lunghezze d'onda è di cruciale importanza in quanto un solo sbando della lunghezza d'onda centrale dei laser DWDM può distorcere il segnale di uno dei canali adiacenti.

Lo sbando di lunghezza d'onda di un laser DWDM e l'errore di trasmissione di segnali SDI multipli lungo una fibra ottica monomodale, non sono e non saranno mai compatibili. Per superare questa possibile causa di errore, la circuiteria di stabilizzazione dei laser DWDM, oltre ai filtri ottici e il layout PCB, devono essere progettati in modo opportuno. Questo è l'unico modo per assicurare che la lunghezza d'onda dei segnali dei diversi canali siano immuni ai cambiamenti di temperatura ambiente.

Applicazioni DWDM nell'ambiente Broadcast

E' possibile costruire collegamenti in fibra punto-punto con una capacità di 16 canali per fibra per interconnettere più terminali. Questo permette trasmissioni simultanee di più canali SDI e moltiplica le capacità della fibra.



In figura viene mostrato come un sistema a 16 canali può essere costruito. Il blocco di costruzione è un sotto scaffale di 4 canali DWDM ad ogni fine delle fibre. Si può iniziare con un sistema a 4 canali, e dopo incrementare le capacità del sistema in passi di 4 canali fino ad arrivare ai 16 canali senza dover riconfigurare l'apparecchiatura esistente.

Il sistema rete Flashlink supporta i seguenti formati di segnali includendo gli zeri finali:

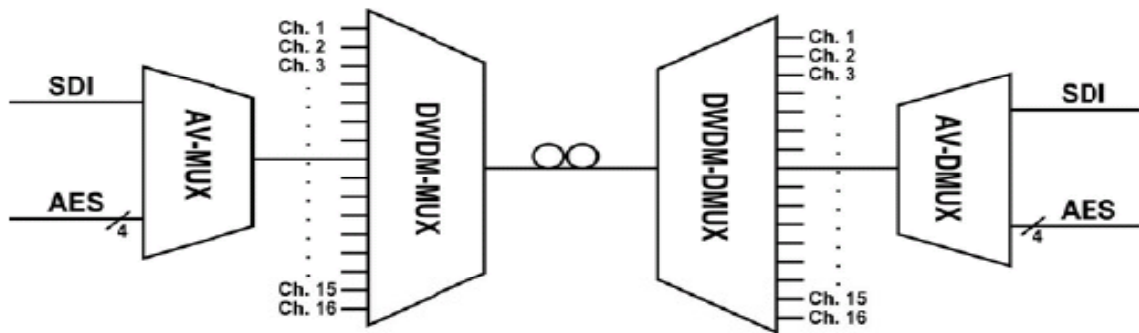
Broadcast:

- 143 Mbps Digital NTSC
- 177 Mbps Digital PAL
- 270 Mbps SDI
- 360 Mbps HDTV
- 540 Mbps HDTV
- DVB-ASI
- SDTI
- M2S (Divicom)
- SMPTE 310

Telecom:

- 140 Mbps E4
- 155 Mbps STM-1 (OC-3c)
- 622 Mbps STM-4 (OC-12c)

Il sistema rete Flashlink DWDM è capace di gestire insieme segnali broadcast e di telecomunicazione nello stesso piano.



In figura possiamo vedere una tipica applicazione broadcast che può essere risolta con un sistema DWDM Flashlink. I 4 canali di AES digital audio sono assemblati nello stream SDI e poi convertiti da segnali elettrici a segnali ottici a lunghezza d'onda adatta al DWDM. Questo processo è indipendente dai processi fatti in ognuno degli altri canali disponibili. Il DWDM può anche dare la possibilità di costruire strutture di contribuzione complessi. La combinazione dei prodotti DWDM con commutatori video digitali di indirizzamento offre un'enorme flessibilità nei canali di trasmissione e ricezione tra diverse località come case in progetto, studi, officine e altri.

DWDM vs CWDM

Attualmente ci sono due tipi di sistemi WDM: Coarse WDM(CWDM) e Dense WDM(DWDM). Dietro a quello che può sembrare, il sistema DWDM è nato molto prima del CWDM, che apparve solo dopo un boom di vendite nel mondo delle telecomunicazioni, che spinse i prezzi ad essere abbassati. Mentre il CWDM spezza lo spettro in grandi pezzi, il DWDM gli divide finemente. Il DWDM attacca più di 40 canali nello stesso range di frequenze usato per soli due canali CWDM.

Il CWDM è definito dalle lunghezze d'onda. Il DWDM è definito in termini di frequenze. La spaziatura fitta e stretta delle lunghezze d'onda del DWDM attacca più canali in una singola fibra, ma ha costi più elevati in termini di implementazione e operazione(manutenzione).

Differenze distintive nei CWDM

Il CWDM può, in linea di principio adattare le capacità base del DWDM ma a più bassa capacità e costo; permette alle portanti di rispondere flessibilmente ai diversi bisogni dei clienti nelle regioni metropolitane dove la fibra può essere un lusso. Tuttavia, quest'ultimo non è in vera competizione con la DWDM in quanto entrambe soddisfano differenti ruoli che dipendono largamente, su diverse circostanze e requisiti di portanti. Il punto e lo scopo del CWDM è quello di rendersi utile per comunicazioni a corta distanza. Quest'ultimo usa un ampio range di frequenze e lunghezze d'onda spaziate opportunamente le une dalle altre. Gli spazi standard tra i canali permettono la possibilità alle lunghezze d'onda generate dai laser di sbandare durante le operazioni di raffreddamento da parte dei laser e apparecchiature ad essi connesse, senza interferire maggiormente sulla qualità del segnale trasmesso.

Differenze distintive nei DWDM

Il sistema DWDM è progettato per una vasta trasmissione di lunghezze d'onda impacchettate strettamente tra di loro. I fornitori hanno trovato varie tecniche per tale scopo, 32, 64 o 128 lunghezze d'onda su una singola fibra. Quando spinti da Erblio (una sorta di potenziatore delle performance per una elevata velocità di comunicazione), gli amplificatori EDFA (Erbium Doped-Fiber Amplifiers), possono permettere a questi sistemi di lavorare oltre migliaia di chilometri.

Canali messi insieme "densamente" non sono immuni alle loro limitazioni. Per prima cosa, l'alta precisione dei filtri è richiesta per estrarre una specifica lunghezza d'onda, senza interferire con le lunghezze d'onda vicine. Queste richieste ovviamente non sono economiche. Per seconda cosa, la precisione dei laser deve garantire l'esattezza dei canali nella loro taratura originale. Questo quasi sempre vuole dire che i laser devono operare ad una temperatura costante. L'alta precisione e stabilità dei laser rendono tali molto costosi in quanto ad essi deve essere associato un sistema di raffreddamento.

Scenari CWDM & DWDM

Il CWDM non può coprire lunghe distanze in quanto il segnale ottico da esso usato non è amplificato. Questo mantiene i costi bassi ma anche alti i limiti di distanza di propagazione del segnale. I fornitori possono offrire range di distanze da 50 a 80km, con distanze di 160km raggiungibili attraverso amplificatori di segnale. Il CWDM supporta un numero di canali minore e questo può essere adeguato per le portanti metro le quali preferiscono di iniziare strette per poi espandersi in base alla crescita della domanda.

I sistemi di non-amplificazione dei segnali mantengono i costi degli ingressi bassi e possono ancora conservare un'alta tolleranza alle perdite. Ogni volta che un segnale non-amplificato viene usato, c'è un compromesso tra capacità e distanza. In poche parole, o si fanno piccole reti con un numero basso di nodi, o lunghe reti con un numero elevato di nodi.

CWDM	DWDM
Definiti dalle lunghezze d'onda	Definiti da frequenze
Comunicazioni a brevi distanze	Comunicazioni a lungo raggio
Usa un ampio range di frequenze	Frequenze ben definite, strette
Le lunghezze d'onda sono largamente spaziate	Le lunghezze d'onda sono ben compatte
Lo sbando di lunghezza d'onda è probabile	Si richiedono laser di precisione per mantenere i canali in banda
Divide lo spettro in grandi porzioni	Divide lo spettro in piccole porzioni
La luce non viene amplificata	L'amplificazione può essere usata

Il CWDM è la tecnologia adatta a scegliere l'efficienza davanti ai costi di trasporto di grandi quantità di dati nelle telecomunicazioni o nelle reti aziendali.

Le reti ottiche e in particolare l'uso della tecnologia CWDM ha dimostrato essere quello più efficiente nei costi sostenuti per ottenere i requisiti prima citati.

Il CWDM tipicamente ha la capacità di trasportare più di 16 canali (lunghezze d'onda) nella finestra spettrale dai 1270 ai 1610nm con una spaziatura tra i canali di 20nm. Ogni canale può operare o a 2.5, a 4 oppure a 10Gbps. Nel sistema CWDM non può essere usata l'amplificazione in quanto i canali sono al di fuori della finestra operativa degli amplificatori EDFA usati nei sistemi DWDM. Questo risultato, in un sistema globalmente contenuto raggiunge approssimativamente i 100km. Tuttavia, a causa della più ampia spaziatura tra i canali, nel CWDM vengono usati laser non raffreddati a basso costo, garantendo quindi un vantaggio nei costi rispetto ai sistemi DWDM.

Solitamente nelle modalità più usate per il trasporto dei segnali vengono usati sia la tecnologia del CWDM che quella del DWDM a seconda del tipo di servizio che si vuole inoltrare, per esempio Ethernet, SDH/SONET e Fibre Channel(FC) nelle reti metro.

Il sistema CWDM è quello più efficiente davanti ai costi tra i due ma ha limitazioni nella distanza di trasporto del traffico dati e nel numero complessivo di canali per tale scopo. Nel trasporto di dati le soluzioni CWDM garantiscono una distanza di copertura, in media, di oltre 100km. Tutte e due le famiglie di trasporto di servizi, TM-Series e TS-series, usano tecnologia CWDM e DWDM. Questo vuole dire che una rete CWDM può essere inizialmente implementata con una delle due serie di prodotti così che quando richiesto, la rete può essere semplicemente aggiornata ad una rete CWDM/DWDM ibrida usando apparecchiature elettroniche ed ottiche in comune tra le due tecnologie.

Quindi l'uso del trasporto di servizi(Transmode) con soluzione per CWDM o DWDM, permette alla rete di essere più flessibile in base al tipo di uso a cui è o sarà destinata.

VERSO IL Tb/secondo

→ Introduzione

Non molti anni fa scaricavamo canzoni musicali nelle ore più impensate per riuscirci in almeno un quarto d'ora, adesso in un paio d'ore possiamo scaricare un nuovo videogioco, tra qualche anno potremo scaricare qualcosa come 80 film in un solo secondo. Non è ottimismo, né fantascienza. In laboratorio è già realtà.

Per comprendere meglio la portata di questo nuovo record, è sufficiente considerare che la massima velocità che possono toccare le reti locali più recenti, le LAN, è di 1Gbps, o che l'attuale infrastruttura del web si aggira sui 10Gbps.

L'alta velocità nella trasmissione dei dati che si ottiene introducendo dei fotoni (ovvero particelle di luce) all'interno di una fibra ottica, avrà un impatto considerevole a livello delle comunicazioni ma anche dal punto di vista ecologico: servirà meno energia elettrica e verrà prodotta meno CO₂.

Solo un decennio fa l'utilizzo, anche solo di una parte, dell'enorme banda messa a disposizione dalla fibra ottica era considerato un sogno. Nel 1996 è stata data notizia, quasi simultaneamente, di tre esperimenti per trasmissioni ottiche a 1Tb/s che utilizzavano tecniche WDM e amplificatori EDFA. Vediamo brevemente quali.

- In Giappone i ricercatori della Fujitsu Laboratories Ltd. sono riusciti ad effettuare una trasmissione a 1.1Tb/s, su fibra convenzionale per una lunghezza di oltre 150 Km ad una lunghezza d'onda pari a 1310nm (corrispondente alla lunghezza d'onda di dispersione nulla), di 55 canali multiplati WDM ciascuno modulato con tecnica NRZ a 20Gbps.

- Ad Holmdel, nel New Jersey (USA), un gruppo di ricercatori degli AT&T Laboratories in collaborazione con la Lucent Technologies hanno effettuato una trasmissione a 1Tb/s per oltre 55 Km di fibra ottica. In questo esperimento, l'uscita di 25 diodi LASER è stata suddivisa nelle due polarizzazioni ortogonali e ciascuno dei 50 segnali risultanti è stato modulato con modulazione NRZ a 20Gbps. La fibra utilizzata è stata una speciale fibra a dispersione spostata che presentava una lunghezza d'onda, in corrispondenza della dispersione nulla, pari a circa 1520nm; che ha dimostrato la controllabilità degli effetti dispersivi e non lineari della fibra.

- L'ultimo esperimento è stato condotto, ancora in Giappone, dalla Nippon Telegraph and Telephone Corporation sempre a 1Tb/s su fibra a dispersione spostata per una lunghezza di 40 Km. In fibra sono stati spediti 10 segnali con tecnica WDM, provenienti da altrettanti LASER, ciascuno portante più segnali a divisione di tempo con modulazione RZ (ottenuta mediante linee di ritardo) per produrre un flusso con velocità di 100Gbps. La dispersione e le non linearità presentate dalla fibra sono state compensate con dispositivi disposti lungo la tratta. Dal lato ricevitore è stato usato un rivelatore di fase 4-wave mixing per la ricostruzione del clock e la demodulazione dei segnali.

Recentemente la Nec Corp. è riuscita a espandere queste capacità raggiungendo i 2.6Tb/s usando 126 canali ciascuno modulato a 20Gbps. Esistono, tuttavia, tentativi di compensare la dispersione introdotta dalla fibra ottica sul segnale trasmesso. In figura è riportata la crescita esponenziale delle capacità dei sistemi su fibra ottica dovuta all'evoluzione tecnologica degli ultimi 15 anni.

Si deve ricordare che nei sistemi operanti come nodo di comunicazione tra più nazioni, soggetti ad un grosso volume di traffico, per mantenere bassi costi è necessaria la definizione di standard internazionali. Per molto tempo è stato seguito un protocollo orientato alla trasmissione su fibra: il SONET (Synchronous Optical Network), nel quale i dati vengono trasmessi in finestre temporali di $125\mu\text{s}$ ciascuna contenente un pacchetto di bit definito dal protocollo. Ogni pacchetto è diviso in due parti: un header, per il funzionamento e la gestione della rete, e una parte dati contenente l'informazione da trasmettere (ad esempio pacchetti dati ATM).

L'International Telecommunication Union (ITU) è l'incaricata di specificare le lunghezze d'onda per uso internazionale e ciascuna nazione, nonché le specifiche per le maggiori compagnie produttrici che sono chiamate ad esprimere il loro parere.

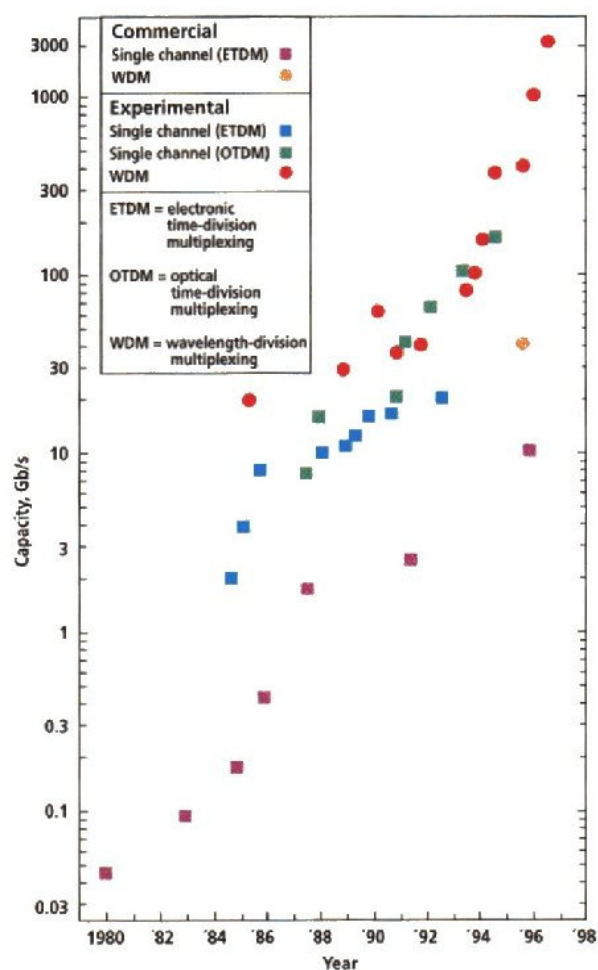
I canali saranno distribuiti su di una scala di frequenze centrata a 193.1THz ($1.5525\mu\text{m}$), distanziati ad intervalli di 100GHz (0.8nm).

Prodotti commerciali optoelettronici basati su questo standard sono già disponibili (modulatori, ricevitori, LASER, ecc.) operanti sul canale ottico OC-192 a 10Gbps . Un uso commerciale dei sistemi WDM verrà fatto introducendo questi come moduli alle terminazioni dei già esistenti collegamenti trasparenti punto-punto, aumentandone drasticamente la capacità, con il vantaggio di non dover sostituire le fibre convenzionali già presenti.

E' indubbio che una scoperta del genere, sebbene lontanissima dalla produzione di massa, è fondamentale per una società che vede crescere ogni anno del 60% la comunicazione via internet. Tra qualche anno però ne parleremo come adesso della nostra ADSL, che, in fondo era fantascienza solo una decina di anni fa.

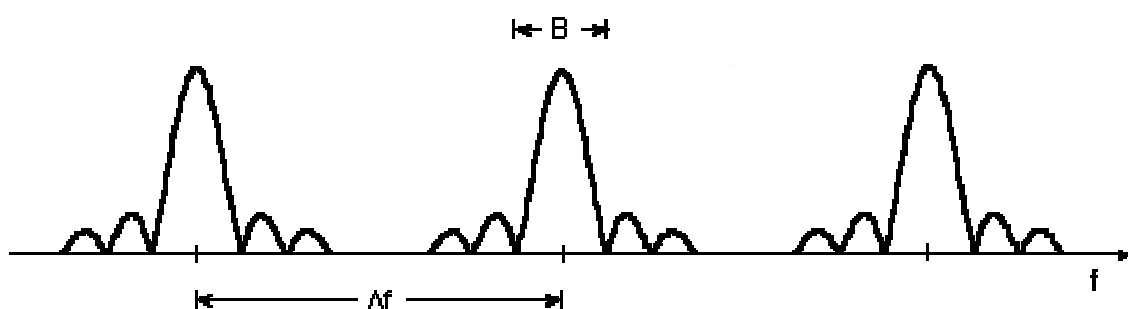
Come è chiaro dalla lettura delle pagine precedenti, la capacità di trasporto dell'informazione di una fibra ottica eccede in linea di principio il Tb/s . D'altro canto, allo stato attuale della tecnologia è impensabile riuscire a sfruttare tale banda attraverso una trasmissione a tale velocità, secondo le tecniche fin qui descritte, per le limitazioni dei componenti elettrici che, in definitiva, producono e trattano l'informazione che transita in fibra.

Le massime velocità di trasmissione monocanale attualmente in uso sono dell'ordine dei 10Gbps . Escludendo l'uso di componenti e tecnologie interamente ottiche, ancora allo stadio di prototipi sperimentali, l'unica maniera per sfruttare la grande capacità della fibra è quella di ricorrere a sistemi multicanale, in cui ogni canale di trasmissione viene "aperto" indipendentemente dagli altri, "modulando una portante" su una particolare lunghezza d'onda (WDM).



Si può realizzare così uno schema di moltiplicazione a suddivisione di lunghezza d'onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing) schematizzato nella figura seguente, che permette di aggregare più canali elementari (ad alta velocità) per realizzare collegamenti ad altissima capacità. Non esiste alcuna differenza di principio tra la WDM e la FDM impiegata nei sistemi elettrici di comunicazione; nell'ambito delle trasmissioni ottiche si suole indicare con WDM una FDM con spaziatura tra le portanti $\Delta\nu$ grande ($\Delta\nu > 100\text{GHz}$ o 1nm), mentre si continua a parlare di FDM nel caso di WDM a spaziatura fitta, in cui cioè la spaziatura tra portanti è dell'ordine di grandezza della banda dei singoli canali B .

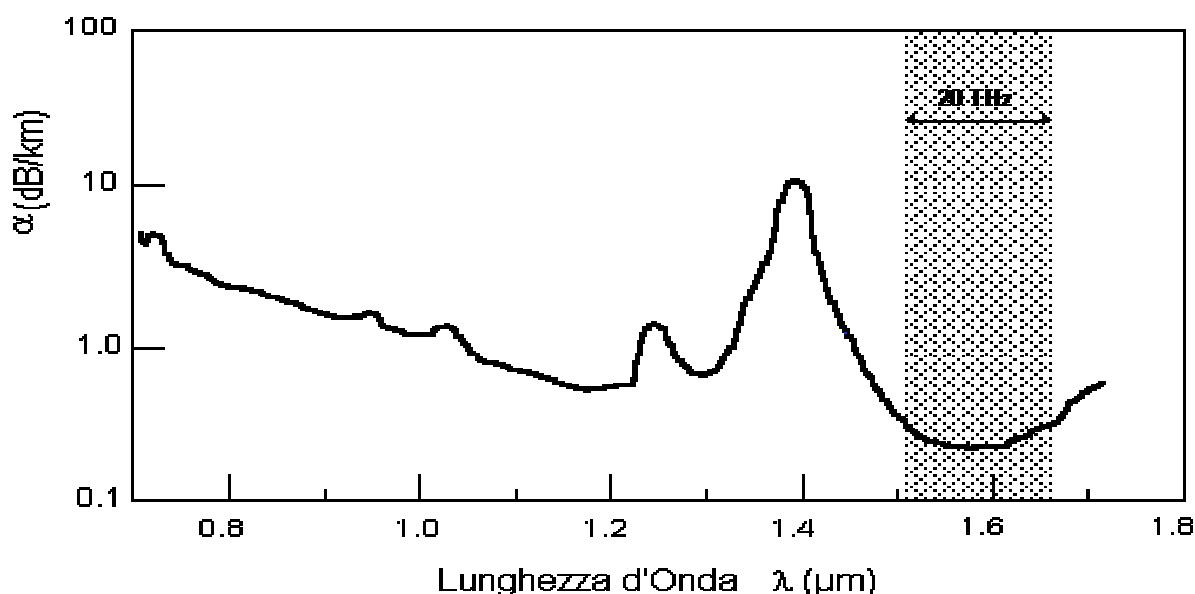
La differenza sostanziale, come sarà chiaro in seguito, consiste nel fatto che il segnale ottico WDM può essere demultiplexato con filtri ottici e rivelato con ricevitori DD mentre i canali FDM possono essere ricevuti solo con demodulatori coerenti ad alta selettività.



La figura seguente mette in evidenza l'estensione di una possibile finestra di trasmissione attorno agli $1.55\ \mu\text{m}$ per segnali WDM ad elevato numero di portanti.

Considerando canali di trasmissione STM-16 a 2.5Gbps , con una spaziatura fitta di 10GHz , si arriva facilmente ad una capacità totale attorno ai 2000 canali in III finestra per un flusso totale di informazione (throughput) di 5Tb/s .

C'è da notare, inoltre, che una eventuale trasmissione monocanale di banda così larga dovrebbe fronteggiare grossi problemi di dispersione del segnale in fibra, che risultano più tollerabili per un aggregato di molti canali ciascuno a velocità di trasmissione (e, quindi, banda) assai più ridotta.



→ Limitazioni e problematiche

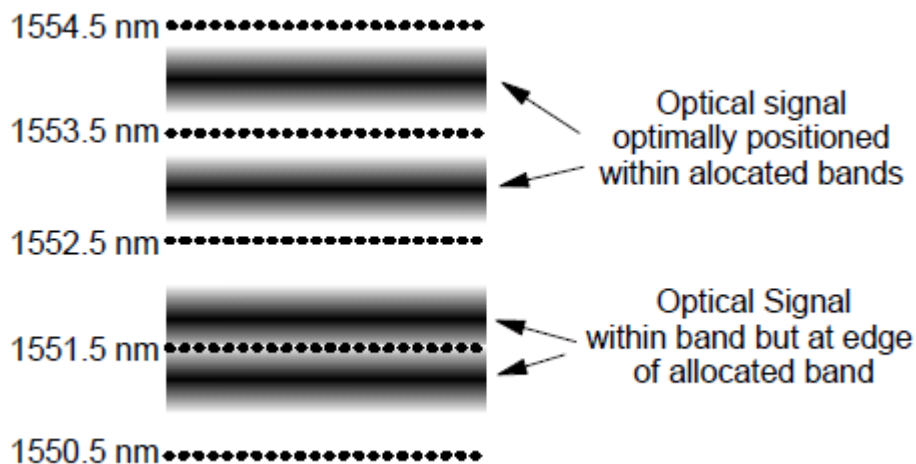
Nel mondo dei sistemi di telecomunicazioni, l'ingegneria è l'arte di prendere alcuni dispositivi e integrarli in un sistema che fa qualcosa di utile per qualcuno. Questa è un'attività non banale come l'interazione tra diversi tipi di attrezzature e le loro operazioni in un campo che deve essere ben capito.

Ci sono alcuni problemi da considerare:

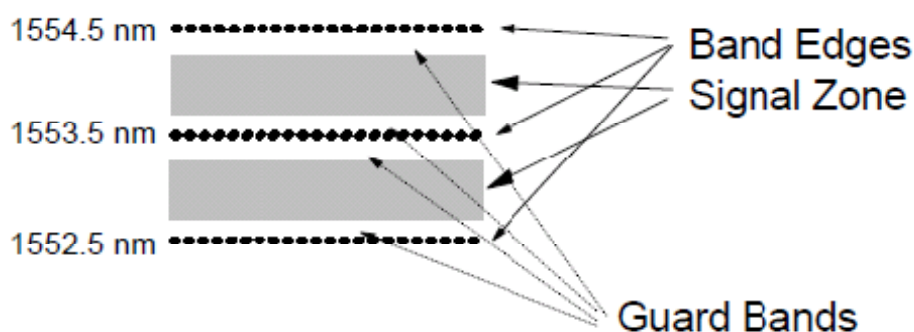
1. determinare la larghezza e lo spazio tra le bande delle onde.
2. stabilizzare le lunghezze d'onda dei componenti sensibili alle loro variazioni.
3. allineamento dei filtri in cascata.
4. controllo di effetti non-lineari.
5. controllo della dispersione.
6. controllo del fenomeno del crosstalk.
7. dinamiche degli amplificatori ottici.
8. controllo del rumore dell'intero sistema(in particolare l'ASE).

Il principio del WDM è lo stesso di quello che viene usato nelle trasmissioni broadcast(radio o tv). diversi "canali" sono inviati in diverse lunghezze d'onda(o frequenze, dipende dai punti di vista) in uno stesso mezzo condiviso. Può quindi sembrare ragionevole pensare che noi siamo in grado di inviare diversi canali come previsto su delle lunghezze d'onda spaziate arbitrariamente vicino l'una dall'altra. Sfortunatamente però questo non è per niente vero, infatti:

1. il segnale ha una larghezza finita(occupa una banda finita di lunghezze d'onda) senza il riguardo di come lo si fa. Modulazioni(la parte d'informazione del segnale) causa un ampliamento del segnale di almeno due volte la frequenza di modulazione.
2. sebbene sia possibile costruire laser con una larghezza di banda molto stretta(10kHz in laboratorio), i laser pratici hanno una larghezza di banda di alcune decine di GHz.
3. consumo o deterioramento dei laser e il drift di cui soffrono in frequenza.
4. i filtri(come per esempio i Litrow Gratings o gli AWG) usati sia per la trasmissione che per la ricezione non possono essere costruiti con assoluta accuratezza(di lunghezza d'onda centrale).
5. i filtri non sono ideali. Questi ultimi fanno passare diverse lunghezze d'onda con diverse attenuazioni per cui non si comportano in modo lineare. Per questo nei sistemi WDM vengono allocate delle bande di lunghezze d'onda(una per canale) che sono significativamente più ampie del segnale stesso. Tale fatto possiamo notarlo nella figura seguente:



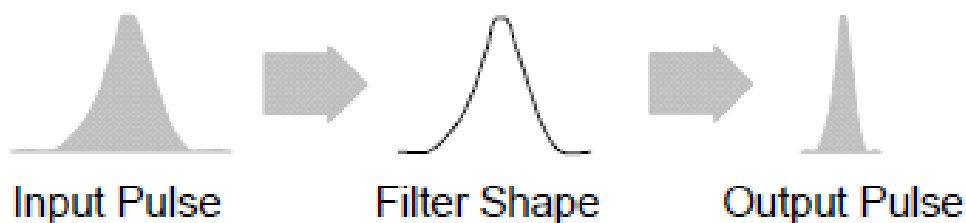
In questa figura i segnali nelle bande più alte sono più centrati ma nelle bande più basse i segnali sono molto vicini ai loro limiti di banda(bordi). Sebbene quindi sia possibile permettere al segnale di risiedere ovunque dentro la banda di lunghezza d'onda, non possiamo filtrare(segnali separati) con un qualsiasi grado di precisione. Abbiamo quindi bisogno di due bande come illustrato nella figura seguente:



Questo è il caso pratico. C'è una banda(ragionevolmente stretta) con la quale il segnale ottico deve essere definito dai filtri(i reticoli o altro, usati per moltiplicare e demoltiplicare i segnali). Fuori questa banda centrale c'è un'altra banda di guardia dove i canali si sovrappongono e non possiamo quindi avere un segnale utile e affidabile.

Filtri in cascata

Il più dei dispositivi che vengono usati nelle reti WDM sono filtri selettivi di lunghezza d'onda di un tipo o un altro. Questa è la particolare realtà degli switch(communatori), i reticoli, gli AWG, ecc, così come anche gli EDFA che si comportano da filtri se la loro risposta è non-lineare. Nelle reti ottiche avremo spesso bisogno di far passare un segnale(tipicamente un impulso) attraverso una serie di questo tipo di dispositivi. Questo processo richiede quindi una progettazione accurata, soprattutto per un futuro incremento di velocità di trasmissione o numero di canali su cui è possibile trasmettere. Il principio è lo stesso di quello dei sistemi analogici di tempo fa, ma oggi giorno sul mondo digitale molti di quelli aspetti si sono superati.



In un mondo ideale, tutti i filtri hanno un profilo quadrato, una banda ben definita. Gli impulsi che gli coinvolgono, o passano o vengono bloccati, dipendendo dalla lunghezza d'onda che portano. Tuttavia il mondo non è per niente ideale e quindi nessun filtro può essere considerato ideale. Infatti la maggior parte dei filtri che troviamo nel mondo ottico hanno una forma a campana di diversi tipi. Possiamo notare questo fatto nella seguente figura in cui abbiamo la risposta in frequenza di diversi filtri con uno stesso impulso in ingresso. Di solito ci si può aspettare che essendo il filtro e l'impulso della stessa forma desiderata e allineati opportunamente, allora il filtro farà passare l'impulso senza problemi. Naturalmente questo non è possibile e possiamo notarlo guardando ciò che accade in figura. L'impulso in ingresso verrà significativamente ridotto.



La figura mostra l'effetto di filtri multipli in successione. Per esempio, in un sistema WDM (su cui si usano reticoli sia in multiplexing che in demultiplexing)) ogni impulso passa attraverso due reticoli in successione. L'effetto è tale che l'impulso in ingresso è ridotto ulteriormente. Un altro (forse migliore) modo di vedere questo, è dire che una successione di filtri può essere messa insieme per avere le caratteristiche di un singolo filtro (più stretto).

Ci sono vari aspetti interessanti su cui discutere in questi ambiti:

1. in linea di massima, ridurre l'intensità di un impulso non è proprio un male. Da un certo punto, infatti, tale atto riduce gli effetti di dispersione cromatica (riducendo la larghezza di banda dell'impulso).
2. quando i filtri non sono esattamente allineati l'uno con l'altro (quando le lunghezze d'onda centrali non sono esattamente le stesse) l'effetto di riduzione è maggiore. Questo vuole dire che l'allineamento del filtro è un problema critico nella progettazione di reti ottiche.
3. stringere la larghezza di banda del filtro, riduce larghezza di segnale che può gestire in ingresso e taglia fuori il margine di disallineamento che il filtro in trasmissione può avere con i filtri successivi. Anche se la banda allocata alle lunghezze d'onda potrebbe essere un po' larga (1nm), la finestra permessa dai filtri può essere tanto stretta quanto 0.2nm, forse. Questo quindi richiede estrema precisione e stabilità dalla parte dei laser in trasmissione. La banda passante ristretta può quindi essere anche una fonte di rumore se il laser ha qualche difetto o drift di lunghezza d'onda.

4. l'attenuazione di una serie di filtri concatenati non è la somma delle attenuazioni dei singoli filtri, o piuttosto, se si vede un segnale in ingresso in particolare, e si pensa che un particolare filtro lo attenua di 6dB, allora la serie di 2 filtri connessi non avrà attenuazione di 12dB, ma più bassa! forse intorno agli 8, 9dB. Il motivo di tutto questo è che il segnale è stato ristretto di banda e modellato durante il percorso del primo filtro e quindi quando questo entra nel secondo filtro, il profilo del segnale d'ingresso sarà già più adatto ad essere ricevuto dal secondo filtro che presenta le stesse caratteristiche del primo.

Così quando le lunghezze d'onda centrali sono strettamente allineate, l'attenuazione di un paio di filtri può essere significativamente minore della somma delle loro singole attenuazioni. Tuttavia, quando le lunghezze d'onda non sono allineate, l'attenuazione può crescere molto rapidamente al punto da arrivare al punto che niente ci passa più niente!

Fenomeno del Crosstalk

Il fenomeno di crosstalk si verifica nei dispositivi che filtrano e separano le lunghezze d'onda. Una piccola porzione della potenza ottica che finisce in un particolare canale(in un particolare filtro di uscita) finisce effettivamente in un canale adiacente ad esso. Questo fenomeno è criticamente importante nei sistemi WDM. Quando un segnale proveniente da un canale, arriva ad un'altro, la loro interazione sarà quella di generare rumore mutuo. Questo può avere seri effetti nel rapporto segnale rumore(SNR) e quindi nel rate di errori del sistema.

Il crosstalking è spesso ritenuto la condizione peggiore e si verifica in un canale dove il segnale raggiunge direttamente il bordo della sua banda riservata. Il crosstalk è ritenuto come la perdita in dB tra il livello in ingresso di un segnale e il suo indesiderato effetto nel canale adiacente. Valori intorno ai 30dB sono ampiamente considerati accettabili per la maggior parte dei sistemi.

Stabilizzazione delle lunghezze d'onda

Forse l'unico grande problema nell'usare la tecnologia WDM è assicurarsi che un particolare canale nel sistema(una lunghezza d'onda) sia lo stesso che viene fuori dal sistema. Quando trasmettiamo su un particolare canale, dobbiamo essere sicuri che la trasmissione è quella della lunghezza d'onda voluta con una certa tolleranza supportata dal sistema. Quando una lunghezza d'onda è demultiplata(divisa) dobbiamo essere sicuri di aver individuato quella corretta tra tutte quelle presenti. Quando un certo numero di canali sono posti dentro una singola fibra ottica, dobbiamo quindi essere sicuri che l'una non interferisca con l'altra. Bisogna quindi avere delle lunghezze d'onda ben definite e con caratteristiche stabili in modo da non costituire un problema critico per il sistema.

Controllo della stabilità tramite la temperatura

Nella stabilizzazione delle lunghezze d'onda, il problema critico per la maggior parte dei componenti del sistema è il controllo della loro temperatura di funzionamento. Ogni componente sensibile alle variazioni di lunghezza d'onda, cambia la lunghezza di lavoro per cui è stato progettato con la variazione della temperatura ambiente.

Il problema è molto più marcato in componenti attivi, quindi in grado di erogare potenza da se, e che quindi si scaldano durante il loro funzionamento (i laser p.e.). Il problema si presenta però anche in componenti quali i reticoli in trasmissione e ricezione, e componenti che richiedono il posizionamento esatto delle fibre ottiche ad essi incidenti (p.e. i circolatori). Questo ci suggerisce quindi, che alcuni componenti sono più sensibili di altri davanti alle variazioni di temperatura ambiente. Con la maggior parte dei laser abbiamo bisogno di raffreddarli individualmente con raffreddanti a stato solido. Altri componenti (come i reticoli Littrow), hanno bisogno di raffreddamento, oppure di riscaldamento, dipendendo dalle condizioni ambientali in cui si trovano. Tuttavia, partendo dal fatto che essi non possono produrre calore, si può pensare di proteggerli con degli isolanti per minimizzare i problemi di stabilità della loro temperatura.

Un altro approccio ovvio da applicare è quello di costruire dispositivi ottici (in particolare quelli planari) con materiali di coefficiente di espansione molto basso. Questo minimizzerà quindi il nostro problema. Tuttavia, anche se questi materiali sono disponibili, essi non sono sempre adatti per soddisfare i requisiti richiesti per una specifica e desiderata applicazione. I reticoli per fibre ottiche per esempio, possono essere compensati molto bene per contrastare a questo fenomeno col montaggio di uno stadio guidato in tensione e costituito da una striscia bi-metallica. Questa striscia è fatta in modo da poter applicare una variazione di tensione nella fibra, dipendendo dalla temperatura in cui si trova la fibra stessa. La tensione applicata nella fibra, cambia la lunghezza d'onda del reticolo nella direzione opposta del cambiamento della lunghezza d'onda, causata dal calore dentro la fibra. I due effetti possono essere bilanciati per poter ottenere una temperatura stabile.

Laser Chirp

L'interazione degli shift di lunghezza d'onda con i filtri nel sistema, possono essere una prima sorgente di rumore. Questi due fenomeni possono essere minimizzati, scegliendo laser progettati per generare delle vibrazioni (chirp) interne minime, che sono quelle che fanno innalzare la temperatura del componente. Essendo queste vibrazioni generate dal tipo di modulazione di onda usato, in quanto questo fenomeno cresce con la frequenza di variazione, il miglior modo per contrastare a questi problemi è quello di usare un modulatore esterno.

In questo modo i laser sono quindi obbligati a generare un impulso di luce a livello stabile e il modulatore esterno aggiunge le informazioni che deve aggiungere. Quindi sul laser non si verificheranno questi fenomeni di vibrazione interna. Il problema principale qui è l'elevata perdita di potenza causata dall'inserzione dei modulatori esterni. Ci si può aspettare una perdita complessiva che va dai 6 ai 12dB dipendendo dal tipo. La soluzione sarebbe quella di integrare i modulatori nello stesso chip del laser in modo da rendere minime le perdite.

Laser Drift

Durante il loro tempo di vita, i laser tendono a decentrarsi dalla lunghezza d'onda per la quale sono stati progettati. Questo fatto è dovuto alla degradazione dei materiali di cui è costituito. Il fenomeno del drift (sbandamento) è quello che costituisce il problema più significativo nei sistemi WDM e una qualche forma di compensazione deve quindi essere applicata.

Controllo di effetti Non-lineari

Alcuni effetti non-lineari prevalgono nella trasmissione su fibra. Nel mondo WDM questi effetti devono essere considerati e controllati all'interno del sistema per operare in modo corretto.

Four-Wave Mixing (FWM)

Il FWM è il problema più serio nei sistemi WDM. E' fortemente influenzato da due fattori:

1. spaziatura tra i canali
2. dispersione in fibra

Il FWM cresce molto rapidamente quando i canali sono poco spazati, quando sono molto vicini tra di loro. Anche se il FWM può coinvolgere vari canali, in pratica questo fenomeno si verifica solo tra canali adiacenti. Perché il FWM sia rilevante, bisogna che ogni canale sia in fase col suo canale adiacente per una qualche distanza considerevole. Così, se la dispersione è elevata (come quando si usano fibre standard nella banda dei 1550nm), allora gli effetti del FWM sono minimi. Con fibre (DSF), l'effetto della FWM è massimizzato.

Usando fibre DSF (con dispersione zero nella banda dei 1550nm), il FWM causa qualche degradazione nelle spaziature dei canali larghi meno di 80GHz. Ad una separazione di canale di 25GHz, circa l'80% dell'energia nei due segnali si trasferisce alla somma o alla differenza delle loro frequenze! Bisogna spaziare quindi quanto più possibile i canali.

Usando una fibra standard nella banda dei 1550nm (con dispersione di 17ps/nm/km), l'effetto della FWM sparisce quando la separazione tra i canali è più grande di 25GHz. Tuttavia, ad una separazione di meno di 15GHz, l'effetto (anche sulla fibra standard), diventa molto rilevante.

Le così chiamate fibre ottimizzate per la dispersione hanno quasi gli stessi effetti nel FWM come le fibre standard ma con una dispersione molto più bassa. Un modo per minimizzare l'impatto del FWM è quello di organizzare i canali WDM in modo che il segnale generato da tali non vada ad interferire con gli altri canali WDM. Questo aiuta di molto ma non può superare il problema del rumore generato alla sorgente dei canali WDM. Tra l'altro, alcuni dispositivi WDM sono difficili da costruire se la spaziatura tra i canali WDM è irregolare (reticoli riflettori per esempio).

Scattering di Brillouin (SB)

Lo scattering di Brillouin è un fenomeno che si verifica nelle trasmissioni a singolo canale, tuttavia, può essere presente anche in svariate situazioni WDM.

Lo SB dipende da un certo numero di aspetti:

1. larghezza di banda della linea: più stretta è la banda, più il problema dello SB si presenta, in generale lo SB non è un problema con canali di banda più grande di 100MHz.

2. potenza del segnale: c'è un valore di soglia sotto il quale lo SB non causa problemi.
 3. dimensione del core della fibra: più è piccolo il diametro del core, più è concentrata la potenza e quindi maggiore è l'effetto dello SB.
 4. lunghezza d'onda: lo SB ha maggior effetto nella banda dei 1550nm rispetto a quella dei 1310nm.
- In linea di massima, in generale, non ci si deve preoccupare del fenomeno dello SB se la potenza del segnale richiesta per canale è minore di 5mW.

Scattering di Raman(SR)

Lo scattering di Raman si verifica tra i canali segnale e tra i gruppi di canali.

C'è una buona "regola del pollice" che può dirci quando lo SR ha la probabilità di diventare un problema. "Per mantenere bassa la degradazione dovuta allo SR su livelli accettabili, il prodotto tra la potenza totale e la larghezza di banda ottica totale deve essere minore di 500GHz/W." Tale risultato è rilevante. La larghezza di banda citata è la estensione dei canali WDM. Così, due canali separati di 20nm hanno la stessa "larghezza di banda"(per questo scopo) di 20 canali spazati di 1nm tra di loro. Per esempio supponiamo di avere 10 canali con spaziatura di 200GHz(approssimativamente 1.6nm), la larghezza di banda nella formula sarà $200 \times 10 = 2000\text{GHz}$. Così la potenza totale di tutti i 10 canali sarà limitata a 250mW in questo esempio. Se invece abbiamo 20 canali spazati sullo stesso range di frequenze (usando spaziature di 100GHz) allora la potenza totale disponibile per tutti i canali sarà la stessa del precedente esempio(250mW). Un Watt è una grandissima quantità di potenza. Nella maggior parte di sistemi WDM ogni canale avrà una potenza disponibile minore di 10mW anche per altri motivi. Tra l'altro, lo SR è influenzato dalla dispersione in fibra. Le fibre standard riducono l'effetto di SR della metà(3dB) confrontato con le fibre DSF.

Controllo della dispersione nei sistemi WDM

Il controllo della dispersione nei sistemi WDM è la stessa di quella attuata nei sistemi ottici a singolo canale. Tuttavia ci sono alcune differenze:

1. L'uso di fibre a dispersione traslata non è pratico in quanto bisogna fare attenzione agli effetti di 4-wave-mixing.
2. La compensazione ottenuta usando fibre DCF deve essere fatta in modo accurato per bilanciare le caratteristiche di dispersione della cascata di fibre la cui dispersione è zero sull'intero range di lunghezze d'onda amplificate. Questo è difficoltoso.
3. Quando si usano FBG(Fiber Bragg Grating: un tipo di riflettore costruito su un piccolo segmento della fibra ottica che riflette particolari lunghezze d'onda e fa transitare il resto) si ha bisogno di una precisione molto accurata per compensare l'intero range di lunghezze d'onda. Reticoli con una grande precisione sono molto difficili da costruire. Gli FBG campionati offrono una soluzione a questo problema.

Si può avere anche una FBG precisa e separata per la compensazione di ogni canale in modo individuale. Tuttavia, in questo ultimo caso abbiamo bisogno di mantenere i canali lontani a sufficienza così che i bordi di uno dei loro filtri non interferisca con il segnale nella banda adiacente.

Problemi di amplificazione

Le più importanti caratteristiche di un amplificatore sono il suo guadagno, la sua potenza di uscita e(per sistemi WDM) il loro range di lunghezze d'onda amplificate. E' molto importante la scelta dell'amplificatore, esso deve infatti rispondere a tutte le esigenze per le quali viene scelto. Il range "naturale" di amplificazione di un semplice EDFA è compreso tra i 1535 e i 1560nm. Questo può essere esteso, con l'uso di droganti e amplificatori con un range di amplificazione attorno ai 40nm, attualmente disponibili in commercio.

In generale ci sono tre tipi di EDFA:

1. Amplificatori di potenza sono piazzati immediatamente dopo lo stadio di mixaggio alla fine del trasmettitore di sistema. La potenza in ingresso sarà relativamente elevata.

La limitazione in questo caso è vicina alla totalità della potenza in uscita dall'amplificatore.

Per esempio se vogliamo amplificare un fascio WDM mixato composto da 10 canali partendo da -5dBm con 8dBm di potenza in uscita dall'amplificatore, otterremo 10 canali a 3dBm(2mW). La potenza totale di amplificazione necessaria in questo caso è 20mW.

2. Le linee di amplificazione ricevono un segnale di livello relativamente basso e dobbiamo quindi amplificarle di un numero di dB più grande possibile(30 è un buon numero). Le limitazioni qui sono: guadagno, rumore e la potenza totale in uscita.

3. I preamplificatori hanno bisogno di essere piuttosto sensibili, avere un basso livello di rumore e anche un guadagno ragionevolmente elevato.

Tipicamente però questi preamplificatori non hanno bisogno di un alto livello di potenza di segnale in uscita. A seconda del tipo di sistema, una soglia di -20dBm per canale può essere un valore di potenza in uscita sufficiente.

Quando un certo numero di EDFA sono posti in cascata su una lunga distanza, ci sono 4 problemi che devono essere presi in considerazione:

1. Non-linearità dinamica del profilo di guadagno dell'amplificatore.

2. Generazione di rapide fluttuazioni di potenza

3. Rumore introdotto dagli amplificatori

4. Effetti dipendenti dalla polarizzazione

Di questi, i primi tre sono effetti significanti ma il quarto è di minor considerazione tranne il caso di sistemi con un grosso numero di amplificatori.

Rumore introdotto dagli amplificatori EDFA(Erbium–Doped Fiber Amplifiers)

Erbium–doped fiber amplifiers: sono di gran lunga i più importanti amplificatori per fibra nel vasto contesto delle fibre ottiche per le comunicazioni; essi infatti sono in grado di amplificare in modo molto efficiente la luce nella regione di lunghezze d'onda dei 1500nm, dove le fibre di telecomunicazione hanno la loro minima perdita.

La sorgente di rumore più rilevante in una catena di amplificatori EDFA è causata dalla ASE(Emissione Spontanea Amplificata). Anche se l'effetto può essere irrilevante in sistemi con un numero di stadi di amplificazione relativamente basso, questo può diventare significativo su sistemi con un elevato numero di stadi di amplificazione. Un metodo di controllo di questo fenomeno è quello di filtrare tutte le lunghezze d'onda indesiderate ad intervalli regolari lungo il link. Questo può essere fatto usando filtri FBG. Naturalmente in un sistema WDM, l'operazione di demultiplexing alla fine del ricevitore si libera della maggior parte del rumore nelle lunghezze d'onda fuori quelle d'interesse.

Il principale controllo in questo caso è il progetto del link. Se si lascia decadere il segnale ad un livello basso e poi si applica un guadagno elevato, si avrà un sacco di rumore aggiunto con un elevato guadagno. Per minimizzare il rumore bisogna mantenere il livello del segnale d'interesse ad un valore ragionevolmente alto e amplificare il tutto ripetutamente. Per esempio in un dato link(ipotetico) con un dato SNR come desiderato, allora:

- Due amplificatori spazati di 150km possono causare molto più rumore aggiunto di quello massimo del SNR ottenibile dopo 300km.
- Con una distanza di 100km per amplificatore, allora si avrà bisogno di avere 20 amplificatori per avere lo stesso SNR ad una distanza di 2,900km.
- Dall'amplificazione ogni 50km si può avere un eccesso di 300 amplificatori su una distanza che eccede i 15,000km!
- Infatti il regime di amplificazione ottimale sarebbe il drogaggio del core di un SMF con un po' di Erblio e iniettarlo ad intervalli regolari così che l'intera lunga distanza del link diventi un amplificatore! Questo schema sembra poco pratico per un numero di motivi ma è stato seriamente suggerito. Per il momento però tutto questo è solo un sogno.

Naturalmente nessuno desidera amplificare il tutto troppo frequentemente. Gli amplificatori hanno bisogno di essere alloggiati e alimentati; senza tener conto del costo degli amplificatori, i costi ad essi associati sono molto alti.

Quindi il trucco è quello di progettare il link in modo che la qualità del segnale venga mantenuta ma anche che il numero di stadi di amplificazioni sia mantenuto al minimo.

Rumore nei sistemi WDM

Il rumore è un problema molto rilevante in tutti i sistemi di comunicazione. Nel mondo dell'ottica(e particolarmente nel WDM) ci sono varie sorgenti di rumore. La buona notizia è che la maggior parte delle sorgenti di rumore sono così piccole che le potremmo perfino trascurare.

Negli altri casi la soluzione che dobbiamo prendere per attenuare una forma di rumore, è quella di attenuare anche le altre forme di rumore. Le sorgenti predominanti di rumore in un sistema WDM sono gli amplificatori ASE e il rumore termico nei ricevitori. Tuttavia, nel progetto di un qualsiasi sistema, è molto importante prendere in considerazione le potenziali sorgenti di rumore, così che queste ultime possano essere eliminate o attenuate.

Rumore Laser

Le più importanti sorgenti di rumore nei laser sono:

1. Lo sbandamento di lunghezza d'onda e le oscillazioni residue
2. Intensità di rumore relativa(RIN)
3. Rumore di fase
4. Distorsione della forma dell'impulso

In sistemi ad intensità modulata il RIN e il rumore di fase non sono problemi seri. Lo sbandamento e la distorsione dell'impulso sono comunque sorgenti di rumore significativi. Lo sbandamento allarga la larghezza del canale, così che la dispersione abbia un effetto rafforzante sul rumore. In aggiunta, una sorgente di segnali con sbandamento interagisce con i filtri nel sistema così che diverse quantità di attenuazioni si verifichino in diversi punti dell'impulso. Così lo sbandamento di banda(lunghezza d'onda) può essere la sorgente di rumore più significativa in sistemi ad alta velocità.

Lo sbandamento può essere pressoché eliminato usando modulatori esterni. Il laser produce un costante, non-modulato segnale e un dispositivo esterno aggiunge la modulazione. I modulatori esterni sono quasi sempre usati in sistemi veloci di circa 1Gbps.

I laser per loro natura non producono un impulso che rispetti esattamente le forme desiderate. C'è sempre qualche distorsione. Naturalmente lo sbandamento può causare anche la distorsione nella forma dell'impulso. La distorsione della forma dell'impulso rende più difficoltoso da capire al ricevitore quando l'impulso inizia e quando finisce.

Così un effetto Jitter è creato dove i tempi di clock dei bit a ricevitore non coincidono con quelli dei bit di trasmissione. In alcuni sistemi questo può essere un problema significativo. Tuttavia, c'è anche una sorgente di incertezza nella rivelazione, e così può essere considerato come la peggiore nei termini di SNR e quindi una sorgente di rumore.

Rumore nei Multiplexer

La funzione di multiplexing nella maggior parte dei casi non è una sorgente di rumore nel sistema. Tuttavia, spesso i multiplexer hanno le caratteristiche dei filtri. In questo caso se la larghezza di banda del filtro è troppo stretta o se la lunghezza d'onda centrale non è allineata correttamente, l'interazione del segnale con il filtro produrrà distorsione e rumore.

Trasmissione in fibra

A differenza del filo in rame, la fibra ottica non raccoglie il rumore al di fuori del sistema. E non è nemmeno soggetto a rumore termico. La dispersione dell'impulso dovuta alle caratteristiche della fibra è una significativa sorgente di degradazione del segnale. In aggiunta, gli effetti non lineari possono essere significativi e la maggioranza di essi vengono presi in considerazione in ogni progetto di sistema.

Interazioni col sistema

Un'importante sorgente di degradazione del segnale è causata dall'interazione tra le sorgenti laser sbandate e le riflessioni dei connettori col sistema. Questo è chiamato "variazione di perdita di ritorno". Il più del problema può essere attenuato piazzando un isolamento immediatamente dopo il laser di trasmissione.

Rumore nei Demultiplexer

La funzione di demultiplexing è una funzione di filtraggio, la quale può essere un'importante sorgente di rumore:

- Nessun filtro è perfetto e ci sarà sempre qualche fenomeno di crosstalk introdotto tra i canali. Questa è proprio la potenza di segnale che deve essere diretta ad una particolare uscita, in arrivo da una diversa uscita. La quantità di crosstalk che il sistema può sopportare è un aspetto individuale e varia con il comportamento del sistema. Tuttavia una buona "regola del pollice" è quella per cui il crosstalk introdotto deve essere più di 30dB sotto il livello di potenza del segnale.
- Proprio come l'aspetto di filtraggio dell'allineamento di un multiplexer, la forma di filtraggio e la larghezza di banda del filtro devono essere accuratamente scelte così da non introdurre distorsioni al segnale. L'aspetto più importante è che il filtro deve avere una banda passante piatta. Naturalmente un buon allineamento della lunghezza d'onda centrale è importante.

Rumore nel ricevitore

I ricevitori elettronici aggiungono sempre rumore al sistema:

- La sorgente di rumore più spesso nominata è la "shot noise". La shot noise è una variazione random dei fotoni in arrivo(o elettroni) in segnali di potenza molto debole. Un segnale ottico di una data intensità è infatti un qualcosa che varia in modo random. Questa è una legge fisica, non una regola ingegneristica!
- Così lo shot noise rappresenta l'ultimo limite di rumore di un qualsiasi sistema. Tuttavia, il livello di rumore rappresentato è così basso da non rappresentare un problema pratico.
- La grande sorgente di rumore nei ricevitori a diodi PIN è il rumore termico. Quest'ultimo è generato in tutti i componenti elettronici come resistenze, diodi e amplificatori. Tra l'altro gli APD producono rumore extra come risultato del loro disegno di amplificazione base.
- Nei ricevitori pratici c'è anche il problema della distorsione dovuta alle radiazioni derivanti dai fili nel ricevitore e dagli effetti derivati dalla costruzione di un componente a corrente diretta(se il segnale non è bilanciato in DC).

BIBLIOGRAFIA:

- [1] *Long Distance Transmission Experiments Using the WDM Technology*. IEEE J. of Lightwave Technology Vol 14, No 6, June 1996. p 1287
- [2] Michael S. Borella, et al. (1997) – *Optical Components for WDM Lightwave Networks: Proceedings of the IEEE, Vol 85, No 8* – August 1997. pp 1274–1307
- [3] M. DeBortoli, A. Tofanelli – *Tecnologie Ottiche per l'Accesso: le Soluzioni Passive Optical Network* – Notiziario Tecnico Telecom Italia Anno 13 n. 1 – Giugno 2004
- [4] A. Ciarniello, M. Monacelli – *OPM, la nuova rete Metro Regional di Telecom Italia* – Notiziario Tecnico Telecom Italia Anno 14 n. 2 – Dicembre 2005
- [5] G. Bonaventura, P. Pagnan – *WDM & Metro Optical Networking* – Notiziario Tecnico Telecom Italia Anno 13 n. 2 – Dicembre 2004
- [6] G. Bonaventura – *Verso una Rete tutta Ottica* – Mondo Digitale n.3 Settembre 2005
- [7] R. Sletteng, R&D Engineer – *Network Electronics AS.* – 2003
- [8] A. Nordio – *Documento Multimediale di Supporto alla Didattica per le Comunicazioni Ottiche* – 97/98 – http://www.iet.unipi.it/m.luise/com_ottiche/IdxCapFrm.html
- [9] Wikipedia web site: http://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength-division_multiplexing